

海中環境に対する騒音影響調査手法の開発

著者	平井 由季乃
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2016
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001404/

修士学位論文

海中環境に対する騒音影響調査手法の開発

平成 28 年度

(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋システム工学専攻

平井由季乃

1. 緒言	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 研究の目的.....	3
1.3. 本論文の構成.....	4
2. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な基礎的事項.....	5
2.1. 背景雑音の分類と成因	5
2.2. 可聴周波数帯域による海棲ほ乳動物の分類	7
2.3. 人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響	8
2.4. 海棲ほ乳動物に対する影響調査のための評価基準	9
2.5. 人為雑音影響緩和のための国内外の動き	10
3. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な音響計算.....	13
3.1. 基礎的な音響計算.....	13
3.1.1. ピーク音圧レベル(Peak Sound Pressure Level: SPL_{peak})	13
3.1.2. RMS 音圧レベル(Root-Mean-Square Sound Pressure Level: SPL_{rms})	13
3.1.3. 音源レベル (Source Level: SL)	13
3.1.4. 吸収損失	13
3.1.5. 伝搬損失 (Transmission Loss: TL)	14
3.1.6. 受波レベル (Received Level: RL)	14
3.2. 実海域における現実的な音波伝搬.....	14
3.3. 本研究で用いる音波伝搬解析法.....	15
3.3.1. 放物線型方程式の解法	15
3.3.2. FOR3D の入力ファイル.....	16
4. 本論文で想定する音源.....	20
4.1. 地震探査の概要.....	20
4.2. 地震探査が海洋生物に与える影響.....	20
4.2.1. 行動阻害	20
4.2.2. マスキング	21
4.2.3. 聴覚および物理的障害	21
4.2.4. 長期的な個体数への影響.....	21
4.3. 本研究で想定する地震探査音源.....	21
5. シミュレーション概要.....	23
5.1. シミュレーション海域・時期.....	23
5.2. CTD データと音速プロファイル	23
5.2.1. LEVITUS データ	23
5.2.2. Argo データ	24
5.2.3. 本研究で音速プロファイルを求めるために使用する CTD データ	24
5.3. 海底地形データ	26
5.4. 海底質データ	26

5.5. シミュレーションケース	27
6. シミュレーション結果.....	29
6.1. 提案手法の有効性の検証.....	29
6.2. 海洋環境基礎データが音波伝搬に与える影響の調査	37
6.3. 提案手法を用いた影響調査.....	42
7. 結言	47
謝辞.....	48
参考文献.....	49
研究業績.....	53

1. 緒言

1.1. 研究の背景

人間は海洋から多くの恩恵を受けながら生活している。漁業などの食料資源はもちろん、石油やガスなどの天然資源、エネルギー効率に優れた船舶による海上輸送など枚挙にいとまがない。また、陸上資源が枯渇傾向にある近年、海底下の鉱物資源やエネルギー資源を求め地震探査や海底掘削などが盛んに行われている。

しかし、人間が海洋で様々な機器を使って活動すると、雑音を生じる。これらの雑音は「人為雑音」と呼ばれる。人為雑音のなかでも、大出力で広い周波数帯域を持っている船舶や地震探査音源は、海中を遠距離まで伝搬する (Shockley *et al.*, 1982; Munk *et al.*, 1994)。特に地震探査に使用される音源であるエアガンでは発振地点から 3000 km 以上離れた地点で観測された例がある (Nieukirk *et al.*, 2004)。また、人間活動の増加によって人為雑音の音圧レベルは増加の一途を辿っており、船舶由来の雑音については、1960 年代から 1990 年代までの間で約 3 倍に増加している (Andrew *et al.*, 2002; Mc Donald *et al.*, 2006; Andrew *et al.*, 2011) (Fig. 1.1)。

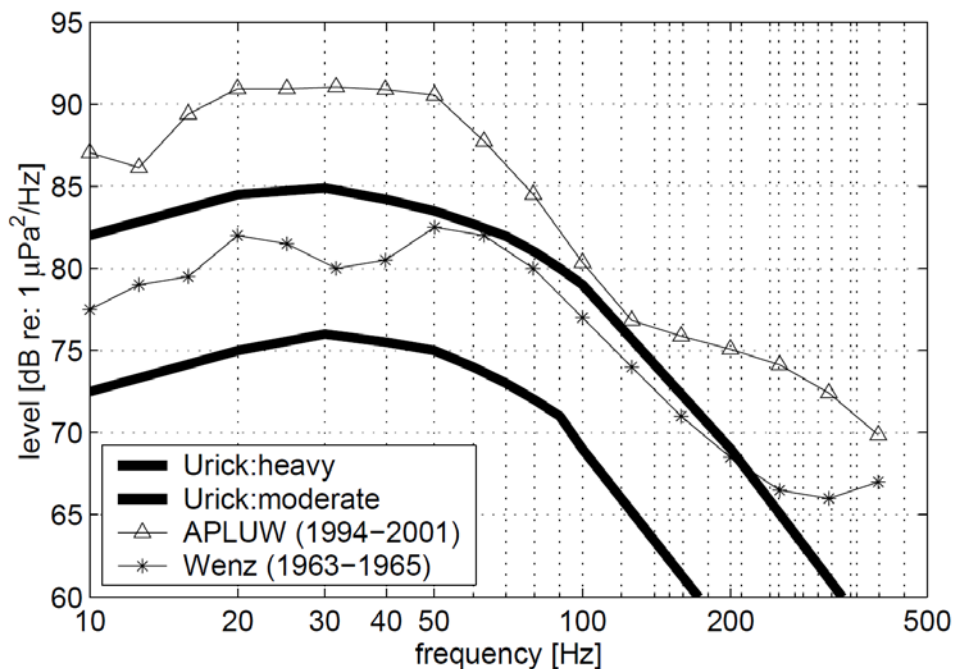


Fig. 1.1 1960 年代と 1990 年代の背景雑音の計測結果の比較

Andrew *et al.*, (2002)より引用

海洋に生息する生物は、主に視覚よりも聴覚に依って行動する種が多い。特に、鯨類や鰐脚類等の海棲ほ乳動物は、仲間とのコミュニケーションや、獲物や捕食動物の存在など周囲環境の情報の把握も聴覚に依っている (Richardson *et al.*, 1995)。そのため、人為雑音は海棲ほ乳動物に対して悪影響を与える「騒音」となり得る (Fig. 1.2)。使用する周波数帯域は種によって異なるが、ヒ

ゲクジラ等の大型の海棲ほ乳動物が仲間とのコミュニケーションに使用する周波数帯域は、地震探査の周波数帯域と重なっているため、特に影響が大きいと考えられている (Richardson *et al.*, 1995).

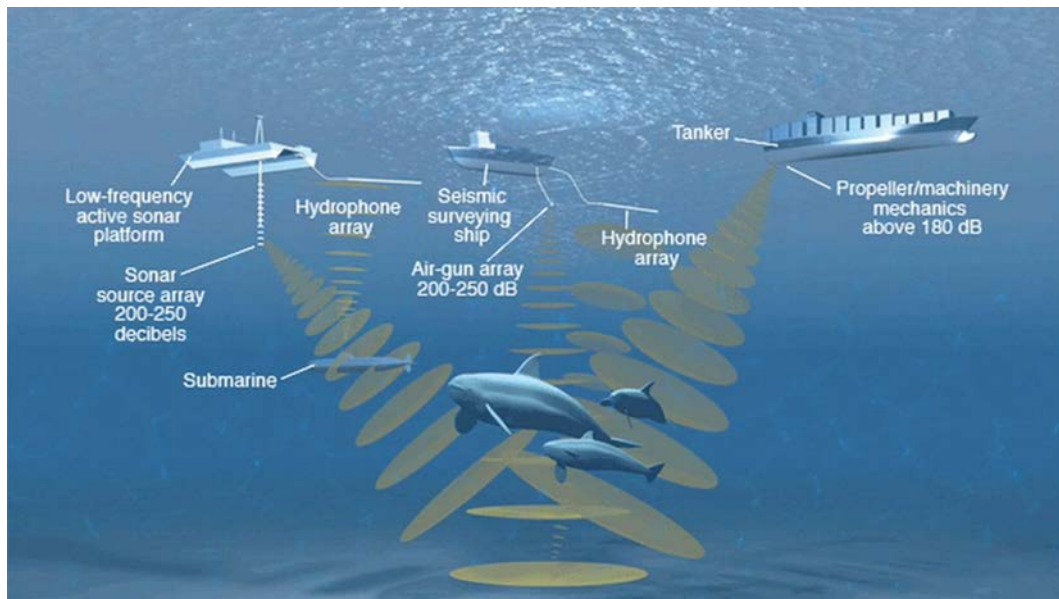


Fig. 1.2 人為雑音源と海棲ほ乳動物

<http://sanctuaries.noaa.gov/science/sentinel-site-program/noise.html> より引用

人為雑音が海洋生物に与える影響が注目され始めたのは 1970 年代である (Payne and Webb, 1971). 米国では 1972 年に海棲ほ乳動物保護法 (Marine Mammal Protection Act: MMPA) が、1973 年に絶滅危惧種法 (Endanger Species Act: ESA) が施行され、両法律により指定されている生物に影響を与える雑音が発生する事業を行う場合には事前にアメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) の国立海洋漁業局 (National Marine Fisheries Service: NMFS) の認可が必要になった (Amy, 2015). 1990 年代以降、人為雑音が海洋生物に与える影響を明らかにするために、海中における生物の聴覚や雑音に対する反応の研究は急速に増加した. それらの研究結果を基に、1995 年には米国で海棲ほ乳動物に対し聴覚障害を引き起こすとする受波音圧レベルの閾値が世界で初めて制定された (NMFS, 1995). 1995 年以降、各国でガイドラインが制定され、雑音源使用時にその距離内に海棲ほ乳動物を発見した場合に音源を停止する「緩和距離」の設定など、影響緩和へ向けた取り組みが盛んに行われてきた.

影響調査・緩和距離の設定の際には、受波音圧レベルが閾値を超過していたら影響を与える可能性があると判断し、超過する距離を緩和距離とする. 聴覚障害を引き起こす閾値について影響調査・緩和距離の設定を行う場合、閾値は一般的な人為雑音源の音圧レベルに対して大きく、障害を引き起こす可能性があるのは音源からごく近距離のみであるため、受波音圧レベルの計算には簡易的な球面拡散モデルを用いることが一般的である (Nowacek *et al.*, 2007). しかし近年、短期的には深刻な影響を与えない行動阻害等でも、それを長時間与えることによって個体数の減少や生息地の変化など深刻な事態につながるという研究結果が多く報告されており (Bejder *et al.*,

2006; Lusseau 2004; Williams *et al.*, 2006; Lusseau and Bejder, 2007), 行動阻害を引き起こす閾値について影響調査・緩和距離の設定を行うことが検討され始めている (NOAA, 2016a). 行動阻害を引き起こす閾値について影響調査・緩和距離の設定を行う場合, この閾値は, 一般的な人為雑音源の音圧レベルに対して小さいため, 遠距離まで考える必要がある. 遠距離における受波レベルの計算では留意すべき点が多くある. 音波は実際の海中においては単純に拡散するのではなく, 音速プロファイルの勾配による屈折と海面や海底による反射・吸収を繰り返すことによって多様な伝搬経路を通り, それらが干渉し合うことで複雑な音場を生じる (NRC, 2003). 音速プロファイルは, 水温・塩分・圧力によって決定されるため海域や季節の違いによって大きく変動する. また, 海底地形や海底の底質によっても反射経路が大きく変化する (NRC, 2003). そのため, 受波レベルは簡易的な球面拡散モデルで計算することはできず, 対象とする位置・時期の正確な海洋環境基礎データを入力した音波伝搬シミュレーションによって求める必要がある (NOAA, 2016). 広大な海洋において, 対象とする位置・時期の海洋環境基礎データを取得することは容易ではない. 特に音速プロファイルについては, 現状では LEVITUS データ (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/LEVITUS/>) などの過去の統計データや船舶で対象海域に赴いて観測したデータが使用されている (Vedenev and Shatrin, 2014). しかし, 統計的に処理されたデータは, 短期的な変動が含まれていない. また, 船舶でデータを取得するには膨大なコストを要するため現実的ではない. そのため, 対象とする位置・時期についてより高精度かつ低コストに影響調査・緩和距離の設定を行う方法が現在検討されている.

1.2. 研究の目的

前節で述べたように, 近年, 海棲哺乳動物に対する行動阻害を対象とした影響調査や緩和距離の設定が検討され始め, 対象とする位置・時期の正確な海洋環境基礎データを入力した音波伝搬シミュレーションが必要とされているが, 時期による変動が大きい音速プロファイルの取得が難しいことが問題となっている. そこで本研究では, 行動阻害を対象とした影響調査手法の開発を目的とし, 音速プロファイルをリアルタイムかつ取得が容易な Argo データから求める手法を提案する.

まず, 提案手法の有効性を検証するために, 同一測線において, 夏季と冬季の Argo データから求めた音速プロファイルを用いた音波伝搬シミュレーション, 従来手法である球面拡散モデル, および統計データ (LEVITUS データ) を用いて計算した人為雑音源から受波点までの音場を比較し, 季節性の水温変動が音波伝搬に与える影響を調べる. また, 海底地形データとして, 世界中の海洋研究機関からのデータを集積している Google Earth による水深データを, さらに海底質データとして, 海洋情報研究センターが公開している北西太平洋底質メッシュデータを使用した各ケースとも比較を行い, 海底地形・海底質が音波伝搬に与える影響を調べる. さらに, 季節および送受波点が異なる計 4 ケースについて提案手法を用いた影響調査を行い, その結果から緩和距離を求め, 各ケース間を比較し, 将来に向けた影響緩和策の展望について考察する. 対象海域は日本国内におけるザトウクジラの生息域であり, かつ地震探査が盛んに行われている小笠原諸島周辺海域である. 人為雑音源は地震探査のエアガンを想定する.

1.3. 本論文の構成

第1章では、第1節で研究背景として水中騒音問題を概説し、第2節で本研究の目的を述べた。

第2章では、影響調査に必要な基礎的事項として、背景雑音の分類と成因（第1節）、可聴周波数帯域による海棲ほ乳動物の分類（第2節）、人為雑音が海洋生物に与える影響（第3節）についてまとめ、影響に対応する動きとして、鯨類への影響調査のための評価基準（第4節）および人為雑音影響緩和のための国内外の動き（第5節）を紹介する。

第3章では、影響調査に必要な音響計算として、基礎的な基礎計算（第1節）および実海域における現実的な音波伝搬（第2節）についてまとめ、海洋環境基礎データを入力可能な伝搬シミュレーションの重要性を示した後に、本研究で用いた音波伝搬解析手法（第3節）を紹介する。

第4章では、本論文の想定音源である地震探査のエアガンについて、地震探査の概要（第1節）とともに地震探査が海洋生物に与える影響（第2節）をまとめ、本論文で想定した地震探査音源（第3節）を紹介する。

第5章では、シミュレーション概要として、本論文におけるシミュレーション海域・時期（第1節）とCTDデータと音速プロファイル（第2節）、さらに海底地形データ（第3節）、海底質データ（第4節）、シミュレーションケース（第5節）を紹介する。

第6章では、シミュレーション結果として、提案手法の有効性の検証（第1節）、海洋環境基礎データが音波伝搬に与える影響の調査（第2節）提案手法を用いた影響調査（第3節）について述べる。

第7章では結言として本論文のまとめを述べる。

2. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な基礎的事項

2.1. 背景雑音の分類と成因

海中に存在する雑音は、「背景雑音 (Background Noise)」と呼ばれ、「周囲雑音 (Ambient Noise)」と「自己雑音 (Acoustic Self-noise)」に分類される (海洋音響学会, 2004)。周囲雑音はさらに、自然由来の「海中雑音 (Ocean Noise)」と人間活動由来の「人為雑音 (Anthropogenic Noise)」に分類される (海洋音響学会, 2004)。背景雑音の分類を Fig. 2.1 に図示した。周囲雑音は潜水艦に搭載するソナー設計のために古くから研究されてきた (Wenz 1962; Knudsen *et al.*, 1948; Ross, 1976; Urick, 1983)。特に、Wenz (1962) が背景雑音スペクトルをまとめた Wenz 曲線 (Fig. 2.2) は現在も広く使われている。海洋生物の立場から見た背景雑音は、「水中騒音 (Underwater Noise)」もしくは「海中騒音 (Ocean Noise)」と呼ばれる。

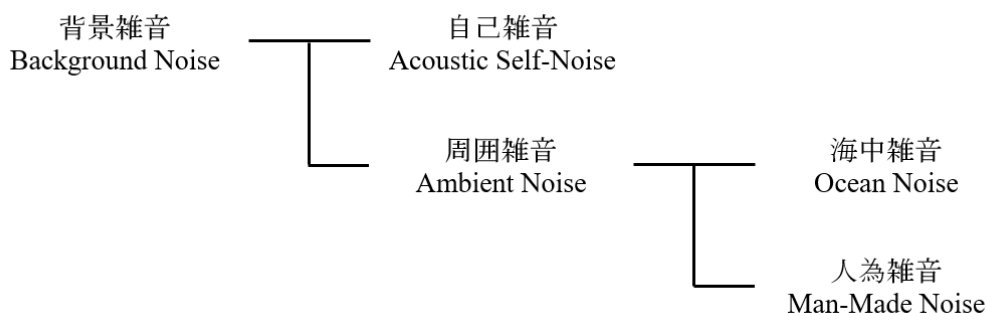


Fig. 2.1 海中における背景雑音の分類

自然由来の雑音である海中雑音の主な成因は波浪である。また、熱雑音および乱流雑音も成因のひとつである (海洋音響学会, 2004)。それに加えて、地殻変動が活発な地域では地震や火山活動、極域では氷塊運動による雑音が存在し、背景雑音の支配的成因となっている場合もある (Richardson *et al.*, 1995)。海域によっては、生息する海棲ほ乳動物や魚類、甲殻類が発する雑音も成因となる (Dahlheim, 1987; Cato, 1992)。さらに雨や雹等の天候の変化も海中雑音を著しく増加させる。

人間活動由来の雑音である人為雑音源としては、主に以下が挙げられている。(NOAA, 2016a)。

- ・ 船舶
- ・ アクティブソナー
- ・ 地震探査
- ・ 水中爆発
- ・ 杭打ち
- ・ 再生可能エネルギー発電装置
- ・ 浚渫
- ・ 砕氷
- ・ 掘削

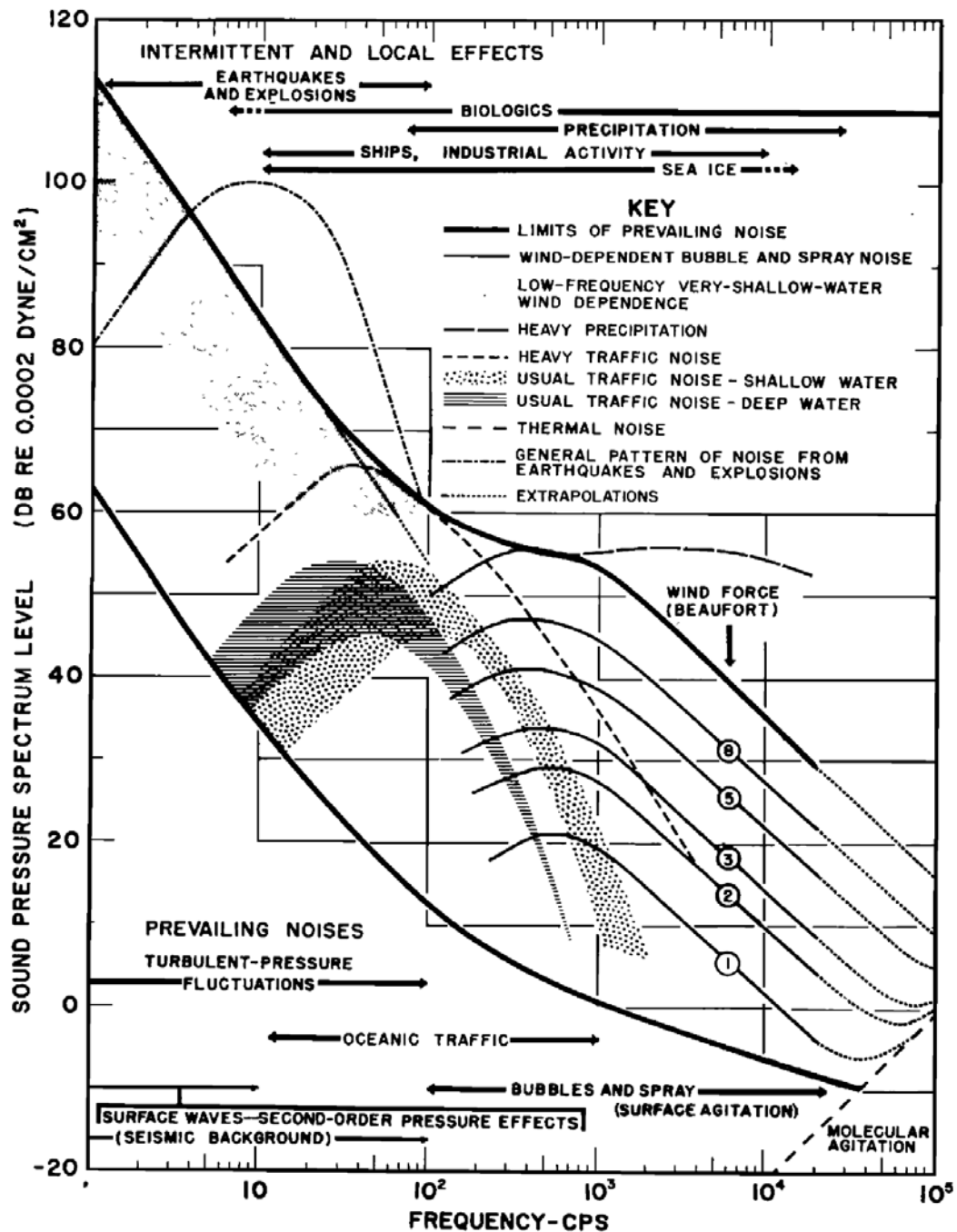


Fig. 2.2 背景雑音の周波数スペクトル
Wenz, (1962)より引用

この中でも、船舶航行音は低周波 (20-300 Hz) であるため減衰が小さく極めて遠距離まで伝搬し、航行中の多数の船舶からの音が合成されることで背景雑音の支配的成因となる (Richardson *et al.*, 1995). また、海底下の地震探査に使用されるエアガンも、強力かつ低周波のパルス音源であるため、長距離を伝搬し、広範囲に大音圧の雑音を生じる (Greene and Richardson, 1988; Nieukirk *et al.*, 2004). さらにこれらの低周波音源は多くの海棲ほ乳動物の使用周波数帯域と重なっており (Fig. 2.3), 大きな影響を与える可能性がある。

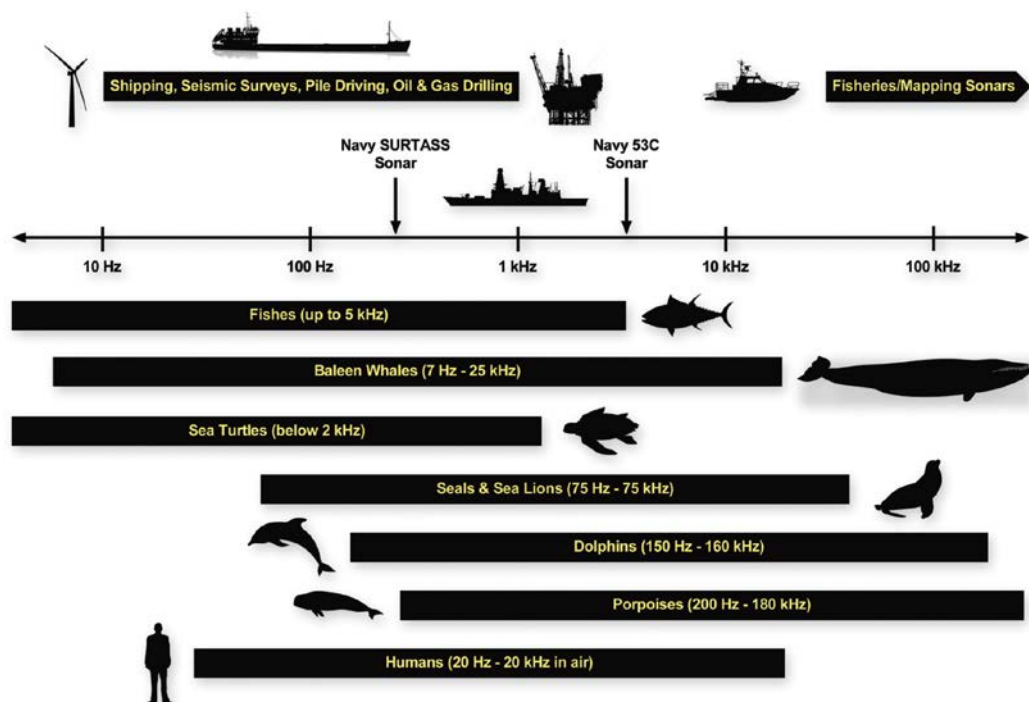


Fig. 2.3 人為雑音源の周波数帯域と海洋生物の可聴周波数帯域
Amy, (2015)より引用

2.2. 可聴周波数帯域による海棲ほ乳動物の分類

人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響を調査するためには海棲ほ乳動物の聴覚特性を理解することが不可欠である。海棲ほ乳動物の可聴周波数帯は種によって異なり、一般的に Table 2.1 のように分類されている (NOAA, 2016b)。これらの値は、ハクジラ類・鰭脚類については直接計測された聴覚データに基づいているが (Southall *et al.*, 2007; Erbe *et al.*, 2016)、ヒゲ鯨については直接計測されたデータが存在せず、解剖 (Parks *et al.*, 2007a)、鳴音 (Ricahrdson *et al.*, 1995; Wartzok and Ketten, 1999)、生物分類、音に対する行動反応 (Reichmuth, 2007) の研究に基づいた推定値である。

Table 2.1 可聴周波数帯域による海棲ほ乳動物のグループ
NOAA (2016b)より引用

聴覚グループ名	可聴周波数帯域
低周波数帯域のクジラ目： Low-Frequency Cetacean (LF) (ヒゲクジラ)	7 Hz to 35 kHz
中周波数帯域のクジラ目： Mid-Frequency Cetacean (MF) (イルカ、ハクジラ、アカボウクジラ、ハンドウイルカ)	150 Hz to 160 kHz
高周波数帯域のクジラ目： High-Frequency Cetacean (HF) (ネズミイルカ、コマッコウ、カワイルカ、イロワケイルカ、 ダンダラカマイルカ、ミナミマイルカ)	275 Hz to 160 kHz

鰭脚類アザラシ科：Phocid Pinnipeds (PW) (アザラシ)	50 Hz to 86 kHz
鰭脚類アシカ科：Otariid Pinnipeds (OW) (アシカ，オットセイ)	60 Hz to 39 kHz

2.3. 人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響

人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響については、対象とする種、音源の種類及び特性、環境（研究室か実環境か）、さらに観察された影響について、多岐にわたって研究されている。与える影響は受波音圧レベルの大きさによって決まる。主な影響として、受波音圧レベルが小さい順に、行動阻害（Behavioral Disturbance）、マスキング（Masking）、聴覚障害（Hearing Impairment）等が挙げられる（NOAA, 2016a）。以下にこれらの影響を概説する。

行動阻害

人為雑音への暴露によって、海棲ほ乳動物が通常の行動を中断することである。例えば、回避行動や摂餌、社会行動や交尾の中断などである。しかし、同じ受波音圧レベルでも種、個体の成熟度、経験、生物学的行動（摂食や繁殖等）、時期によって行動阻害が起こるか否かは変わる（Richardson *et al.*, 1995; Southall 2007 *et al.*）。

マスキング

人為雑音によって、海棲ほ乳動物が仲間との通信やエコーロケーションのために発した鳴音や、生存のために重要な情報である環境音（波や氷塊運動、獲物や敵が発する音）がかき消されることである（Payne and Webb, 1971; Richardson *et al.*, 1995）。これは人為雑音が鳴音や環境音の受波音圧レベルより十分に大きい場合に起こる。マスキングに対する適応手段として、鳴音の周波数帯域のシフト（Parks *et al.*, 2007; Iorio and Clark, 2010）や音圧レベルを増加させる等の行動（Dahlheim, 1987; Iorio and Clark, 2010）が観測されている。

聴覚障害

大音圧の人為雑音への暴露によって引き起こされる生理的難聴のことである。数分から数日間の一時的なもの（Temporary Threshold Shift: TTS）と永久的なもの（Permanent Threshold Shift: PTS）に分けられる。一時的な難聴を複数回繰り返すことで永久的な聴覚障害につながる場合もある（Richardson *et al.*, 1995）。

長期的な影響

また、ホエールウォッチング船による慢性的な行動阻害が個体数に影響を与えたという研究結果もある（Lusseau and Bejder, 2007）。回避行動を頻繁に行わせることで、繁殖機会の減少、死産の増加（Lusseau, 2004）、摂餌機会の減少、移動時間の増加による摂取エネルギー量の減少と消費エネルギー量の増加（Williams, 2006）を引き起こすことが明らかになっている。

2.4. 海棲ほ乳動物に対する影響調査のための評価基準

海棲ほ乳動物に対する人為雑音の影響を評価するために様々な研究機関および研究者によって提案された評価基準を概説する。これらの基準は捕獲した動物を用いた数少ない聴覚実験データに基づいており、実海域ではほとんど検証されていないことに注意する必要がある。

NMFS のガイドライン (1995)

アメリカ海洋大気庁 (NOAA) の国立海洋漁業局 (NMSF) は、RMS (Root-Mean-Square) 音圧レベルを用いて世界で初めて評価基準を設定した。

NMFS はガイドラインとして、海棲ほ乳動物保護法 (MMPA) が定めた「レベル A ハラスメント：海棲ほ乳動物に聴覚障害を引き起こす可能性がある基準」として鯨類に対し受波 RMS 音圧レベル 180 dB re 1 μ Pa、鯨脚類に対し 190 dB re 1 μ Pa、さらに、「レベル B ハラスメント：海棲ほ乳動物の行動を阻害する可能性がある基準」として両類に対し受波 RMS 音圧レベル 160 dB re 1 μ Pa と設定した。NMFS は、これらは予防的な値であると説明している。

HESS (1997) の行動阻害基準

高エネルギー地震探査 (High Energy Seismic Survey: HESS) チームは、Richardson ら (1995) の研究を引用し、海棲ほ乳動物への行動阻害は受波 RMS 音圧レベル 140 dB re 1 μ Pa 以上で起こる可能性が高いと結論付けた。

Southall らの研究結果 (2007)

Southall *et al.* (2007) は、人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響について包括的な総説を発表し、暴露時間を考慮した暴露音圧レベル (Sound-Exposure-Level: SEL) とピーク音圧レベル (Peak Sound-Pressure-Level: SPL_{peak}) の両方の基準を提案した (Southall *et al.*, 2007)。Southall ら (2007) の研究では、永久的聴覚障害 (PTS) は鯨類に対しては暴露音圧レベル 198 dB re 1 μ Pa²s、ピーク音圧レベルは 230 dB re 1 μ Pa、鯨脚類に対しては 186 dB re 1 μ Pa²s および 218 dB re 1 μ Pa、一時的聴覚障害 (TTS) は鯨類に対して暴露音圧レベル 183 dB re 1 μ Pa²s、ピーク音圧レベル 224 dB re 1 μ Pa、鯨脚類に対しては 171 dB re 1 μ Pa²s および 212 dB re 1 μ Pa と設定した。

NOAA (2016) のガイダンス

アメリカ海洋大気庁 (NOAA) は 2006 年に初めてガイダンスを発表し、鯨類に対して PTS を 215 dB re 1 μ Pa²s、TTS を 195 dB re 1 μ Pa²s と設定した。ガイダンスは、パブリックコメントによる更新を複数回行い、2016 年 8 月に最終版が発表された (NOAA, 2016b)。最終版では、海棲ほ乳動物の可聴周波数帯域グループによってインパルス波と非インパルス波 (連続波) それぞれの基準値が設定された。本研究で扱うヒゲクジラに対しては非インパルス波の PTS が 199 dB re 1 μ Pa²s、TTS が 179 dB re 1 μ Pa²s、インパルス波については暴露音圧レベルとピーク音圧レベルが定められており、PTS が 183 dB re 1 μ Pa²s および 219 dB re 1 μ Pa、TTS が 168 dB re 1 μ Pa²s および 213 dB re 1 μ Pa である (Table 2.2)。

Table 2.2 NOAA が定めた海棲ほ乳動物に聴覚障害を引き起こす受波音圧レベル閾値
NOAA(2016b)より引用

	非インパルス		インパルス			
	TTS	PTS	TTS		PTS	
グループ	SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	SPL _{peak} [dB re 1 μPa]	SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	SPL _{peak} [dB re 1 μPa]
LF	179	199	168	213	183	219
MF	178	198	170	224	185	230
HF	153	173	140	196	155	202
PW	199	219	175	226	203	232
OW	181	201	188	212	185	218

2.5. 人為雑音影響緩和のための国内外の動き

現在、人為雑音が発生するオペレーションを行う際の影響緩和策は基準化されておらず、オペレーション毎に定められている。一般的に主に以下のことが要求・推奨されている (NOAA, 2016a)。

急性／直接的な影響を防止するためのリアルタイムな監視と対応

- ・海棲ほ乳動物、魚類、ウミガメ、無脊椎動物に対して障害を引き起こす、もしくは海棲ほ乳動物に対する行動阻害を引き起こす可能性を最小化するための雑音源出力低下／停止領域の設定
- ・沿岸、船舶や航空機、無人機からの保護種の目視監視およびパッシブ音響装置による監視
- ・オペレーションを日中に限定、もしくは夜間専用監視装置の使用

急性的な影響だけでなく慢性的／長期的な影響を小さく抑えるための海域や季節による制限

- ・生物学的に重要な種や特に聴覚感度が高い種が存在する海域や季節におけるオペレーションの禁止や最小限化

急性および慢性的影響両方を防止するための雑音の低減

- ・杭打ちの際のバブルカーテンや杭キャップの設置で音を減衰させる手法
- ・エアガンや杭打ちのソフトスタート
- ・適切な緩和領域と正確な影響推定のための音源の検査

日本でも JAMSTEC が 2013 年に「音波による構造探査における海洋哺乳類への影響緩和ガイドライン」を制定した (<http://www.jamstec.go.jp/j/about/environmental/seismic.html>)。ガイドラインの内容は以下の通りである。

- ・ 航海開始前に可能な限り、探査海域における海洋哺乳類の棲息状況を机上調査する。特に哺乳類の種類と重要活動（例えば移動・繁殖・出産など）の時期について把握に努め、必要に応じ実施時期を考慮する。
- ・ 航海開始前に、当該沿岸国の海洋哺乳類に関するガイドラインを調査し、もし抵触する場合は、当該沿岸国のガイドラインに従い、適宜、以下の3項に規定する影響緩和策を見直す。また、可能な限り、探査に携わる乗組員及び研究者等に対して海洋哺乳類についての教育を行う。
- ・ 機構船舶の探査が、当該沿岸国の海洋哺乳類に関するガイドラインに抵触しない場合は、以下の影響緩和策とする。
 - a) 監視者（ブリッジ等にて海洋哺乳類を監視する者）を配置し、発振を開始する30分前に、海洋哺乳類が音源から※事前に定める範囲（以下「警戒域」とする）にいないことを可能な限り確認する。事前に定める範囲は使用する音源により範囲を設定する。
 - b) 複数の音源を用いる場合、各測線の開始時または60分以上発振を中断した際の発振はソフトスタート（発振を最初に最も低いレベルで起動して徐々に最大まで上げていく手法）によって、時間をかけて行う。また、ソフトスタートの実施方法・パラメータ（実施場所・時間・発振間隔など）については記録する。音源1台のみを用いる場合はソフトスタートを行えないため、通常通りの発振方法とする。ただし、パラメータについては記録する。
 - c) 探査中に海洋哺乳類を警戒域内で視認した場合にはただちに発振を停止する。その後、60分間は発振を行わない。以後はb)の手順に従う。
 - d) 探査中は可能な限り、監視者が目撃した海洋哺乳類を記録する。また、探査終了後は、その監視結果や実施した緩和策の記録について保管する。

ガイドラインには緩和領域の具体的な決定方法については記されていないが、受波 RMS 音圧レベルが 160 dB re 1μPa 以上となる範囲（オーストラリア政府が勧告する海棲ほ乳動物の安全レベル）を目安として決定されている。

また、人為雑音規制導入への機運が国際的に高まってきたことから、世界各国で影響評価手法や緩和策の開発を目標とした多数のプロジェクトが進められている。以下に代表的なもの及び我が国におけるプロジェクトについて概説する。

2010 年、NOAA は人為雑音が海棲ほ乳動物に与える影響評価のためのツールの向上のために「Cetaceans and Sound Mapping: CetSound」というワーキンググループを招集し、海棲ほ乳動物の密度や分布の可視化・検索ツールの開発や、人為雑音の長期的な広域分布の推定を行った。2016 年に発表された「Ocean Noise Strategy Roadmap」（NOAA, 2016a）では以下の4つの包括的な目標を定め、現在も達成に向けた研究が盛んに行われている。

1. 科学：NOAA と連邦関係者との知識のギャップを解消し、人為雑音が生態系規模に与える影響を理解すること
2. 管理：NOAA の機関全体の活動を統合し、海洋生物とその生息域に対する急性、慢性および

累積的な影響を最小限に抑えること

3. 決定支援ツール：人為雑音が生態系規模に与える影響の評価，緩和のための公共利用可能なツールを開発すること
4. 福祉活動：国民への人為雑音問題を浸透させること，利害関係者との交渉を行うこと，関連分野研究者と国際的に協力すること

2008 年に採択された欧州海洋戦略枠組み指令によって，欧州各国は 2020 年までに鯨類等の海洋生物の保護を目的とした人為雑音に対する規制の導入を義務化した．欧州委員会は規制の導入に向け，船舶からの放射雑音低減法の開発や雑音規制に関するガイドラインを作成することを目的とし，「AQUO プロジェクト」を開始した．プロジェクトは以下の WP1 から WP7 の 7 項目によって構成されている (<http://www.aquo.eu/>)．

WP1: Noise Footprint Model (海洋生物に対する影響評価のための人為雑音分布の推定)

WP2: Noise Sources (船舶からの放射雑音の推定手法およびモデルの改良と検証)

WP3: Noise Measurements 海上試験のための新しい測定手法の開発)

WP4: Sensitivity of Marine Life (船舶雑音が海洋生物に与える影響の評価)

WP5: Guidelines to Reduce Shipping Noise Footprint (ガイドラインの作成)

WP6: Dissemination & Exploitation (プロジェクトの普及と活用)

WP7: Management (プロジェクトの管理)

2010 年より，生物多様性条約 (Convention on Biological Diversity: CBD) の会議や国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO) において水中騒音に関する審議が開始され，規制の導入への動きが高まってきた．我が国においても，船舶放射雑音がクジラに与える影響の調査を目的とし，2015 年に国土交通省が「水中騒音プロジェクト」(日本船舶技術研究協会, 2015)を開始した．

3. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な音響計算

3.1. 基礎的な音響計算

3.1.1. ピーク音圧レベル(Peak Sound Pressure Level: SPL_{peak})

エアガンの単発発振のようなインパルス波の場合、ピーク音圧レベルは時間領域で測定された瞬間的な最大音圧値であり、以下の式で表される (JASCO, 2011).

$$SPL_{peak}(zero - to - peak) = 20 \log_{10}(\max(|P(t)|)) \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa]}$$

3.1.2. RMS 音圧レベル(Root-Mean-Square Sound Pressure Level: SPL_{rms})

非インパルス波 (連続波) を扱う場合、RMS 音圧レベルが使用される. 連続音を発する雑音源としては、船舶、ソーナー、掘削等が挙げられる. RMS 音圧レベルは時間領域で測定された波形のうち時間窓 t の区間を二乗平均平方根とした音圧レベルであり、以下の式で表される (JASCO, 2011).

$$SPL_{rms} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \right) \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa]}$$

3.1.3. 音源レベル (Source Level: SL)

SL は音源からの基準距離 (通常は 1 m) における見かけ上の音源音圧レベルである. 実際には音源の音圧レベルは 1 m のような近距離で測定できることは少なく、遠距離における測定値から伝搬過程を逆算して推定される (Gisiner, 2016).

3.1.4. 吸収損失

海水中の吸収損失 α は、主にホウ酸および硫酸マグネシウム分子の共鳴による緩和吸収および海水の粘性吸収によるものである. 以下の式 (Francois and Garrison, 1982a; Francois and Garrison, 1982b) によって表される.

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{pH-8}{0.56}} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \frac{S}{35} \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-\frac{z}{6}} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{\frac{T}{27} + \frac{z}{17}} \text{ [dB/km]}$$

ここで,

$$f_1 = 0.78 \frac{S^{\frac{1}{2}}}{35} e^{\frac{T}{26}} \text{ [kHz]}$$

$$f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}} \text{ [kHz]}$$

また、温度 T [°C], pH, S [ppt], z [m]は,

$$-6 < T < 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \ (S = 35 \text{ ppt}, \text{pH} = 8, z = 0)$$

$$7.7 < \text{pH} < 8.3 \ (T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}, S = 35 \text{ ppt}, z = 0)$$

$$5 < S < 50 \text{ ppt} \ (T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{pH} = 8, z = 0)$$

$$0 < z < 7 \text{ km} \ (T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}, S = 35 \text{ ppt}, \text{pH} = 8)$$

3.1.5. 伝搬損失 (Transmission Loss: TL)

TL は音波が音源から受波点に伝搬するまでに損失した圧力である。理想的な伝搬損失としては下記の 3 種が使用される。

球面拡散損失

音源の近くでは音波は球の面方向に均一に伝搬し、音源からの距離 r [m] における TL は以下の式で表される。 α [dB/km] は海水の吸収損失係数である (海洋音響学会, 2004)。

$$TL = 20 \log_{10} r + \alpha r$$

円筒拡散損失

浅海域では海面と海底に囲まれた導波管の中を円筒の周方向に均一に伝搬し、音源からの距離 r [m] における TL は以下の式で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$TL = 10 \log_{10} r + \alpha r$$

複合拡散損失

音波は音源の近くでは球面状に伝搬するが、球面波が海底に到達した後は円筒状に伝搬する。水深 H [m] よりも大きい距離 R [m] では、TL は以下の式で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$\begin{aligned} TL &= 20 \log_{10} H + 10 \log_{10} \frac{R}{H} + \alpha R \\ &= 10 \log_{10} H + 10 \log_{10} R + \alpha R \end{aligned}$$

3.1.6. 受波レベル (Received Level: RL)

RL は任意の深度・音源からの相対距離における音場の強度である。音場は深度・距離に応じて変化するので測定を行った深度・距離を明記する必要がある。音源からの距離 r における受波レベルは以下の式 (ソーナー方程式) で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$RL = SL - TL$$

3.2. 実海域における現実的な音波伝搬

実際の海中における音波伝搬は、3.1.7 に示した理想的な拡散をすることはなく、音速の深度方

向の勾配に起因する屈折や海面反射・海底反射に支配される (NRC, 2003). そのため, 実海域における現実的な音波伝搬はごく近距離では 3.1.7 に示した理想的な拡散と一致するが, それ以上の距離においては過小もしくは過大評価となってしまう. また, 音速の深度方向の勾配は海域や時期によって大きく異なり, 海底反射を決定づける海底地形や底質の分布は不均一で非常に複雑な構造をもつ (海洋音響学会, 2004). このように複雑な音波伝搬の現象を正確に推定するためにはコンピュータ計算モデルを用いる必要がある (NRC, 2003). 海底・海面をもつ海洋での音波伝搬は距離 r , 深度 z , 角度 θ , を変数とする円筒座標で考え波動方程式を解く必要がある. このような波動方程式を解く音波伝搬解析法は大きく下記の 3 つに分類できる (海洋音響学会, 2004). また, 各分類における代表的な解析法を下記に示す.

高周波近似を用いる解析法

音線理論 (ray theory)

距離に依存しない (range independent) 解析法

ノーマルモード法 (normal modes method)

距離に依存する (range dependent) 解析法

放物型方程式法 (parabolic equation method)

3.3. 本研究で用いる音波伝搬解析法

本研究は地震探査のエアガンから発せられる低周波音波を扱うものであり, 海棲ほ乳動物の行動阻害可能性のある範囲を調査するために長距離の解析を行う. そのため, 3.2 に示した高周波近似を用いる解析法や, 距離に依存しない解析法を使用することはできない. したがって, 本研究では距離に依存する解析法である放物線型方程式法のコンピュータ計算モデル FOR3D (D.Lee & M.H. Shultz, 1995) を使用して音波伝搬解析を行う. FOR3D では 3 次元解析を行うことが可能だが, 実際の海洋において音波の水平方向の屈折は無視することができ (NRC, 2003), 解析に要する時間を大幅に削減できることから, 本研究では 2 次元解析を行う.

3.3.1. 放物線型方程式の解法

放物線型方程式の解法について以下に述べる. 海洋環境が方位方向に変化のないものとして伝搬方向の距離を r , 深度を z , とした 2 次元音場を考えた場合, ヘルムホルツ方程式は

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k_0^2 n^2 p = 0$$

と表される. ここで, k_0 は基準波数, $n(r, z)$ は屈折率, $\rho(z)$ は密度, $P(r, z)$ は音圧である. 海洋環境が伝搬距離方向に緩やかに変化すると仮定し, この解を深度方向の波動場 $u(r, z)$ と伝搬距離方向のハンケル関数の変数分離形として表すと,

$$P(r, z) = u(r, z)H_0^{(1)}(k_0 r)$$

ハンケル関数を遠方界近似 ($k_0 r \gg 1$) し, 進行波のみの局所解を考えると,

$$u(r + \Delta r, z) = e^{-\delta} e^{\delta \sqrt{1+X^+Y^+}} u(r, z)$$

$$\delta \equiv ik_0 \Delta r$$

ここで,

$$X^+ = n^2(r, z) - 1 + \frac{1}{k_0^2} \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$Y^+ = \frac{1}{k_0^2 r^2} \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

広角化のために平方根演算子に高次有理関数近似を行うと,

$$u(r + \Delta r, z)$$

$$= e^{-\delta} e^{\delta \left(1 + \frac{1}{2} X^+ - \frac{1}{8} (X^+)^2 \right)} e^{\frac{1}{2} Y^+} u(r, z)$$

が得られる. この式はマーチング・スキームによって解くことができる.

3.3.2. FOR3D の入力ファイル

FOR3D プログラムは, FORTRAN90 によって記述されており, メインルーチンプログラムとサブルーチンプログラムによって構成されている. 計算時にはコンパイルを行い実行ファイルを作成する. 通常メインルーチンは変更されることがなく, サブルーチンを変更するだけでよい. サブルーチンは, 入力ファイルとパラメータファイルで構成されており, 計算時には主に入力ファイルの周波数, 音源深度, 各媒質層の層厚, 深度方向の音速プロファイル, 密度, 吸収係数を, 設定する. また, 距離方向に異なるパラメータを複数点設定することができる.

FOR3D の入力ファイルを下記に示す.

LINE INPUT DATA

```

1  TITLE
2  NDIM
3  FRQ,ZS,C0,ISF,RA,ZA,N,IHNM,ITYPES,ITYPEB,ITYPPW,ITYPSW,FLDW,NSEC
4  RMAX,DR,WDR,WZ1,WZ2,WDZ,WDTH,PDR,PDZ,PDTH,ISFLD,ISVP,IBOT
5  DOUGRA,NDIV
6  U1,U2,U3,U4,U5,U6,U7,U8,U9,U10,U11,U12
7  KBOT
8  R1,Z1  **      IF KBOT = 0, BOTTOM PROFILE IS IN RUNSTREAM.
9  R2,Z2   *      RANGE, WATER DEPTH (METERS).
      .         **   -1,-1 MARKS END OF THIS PROFILE.
      .         ***  ENTER PROFILE FOR EACH SECTOR BOUNDARY.
      .         **   PORT BOUNDARY FIRST.
```

N . * IF KBOT NE 0, UBOTTOM IS CALLED. OMIT
 N+1 -1,-1 ** LINES 8 THRU N+1.
 N+2 RSVP *
 N+3 KSVP
 N+4 NLYRS(L)
 N+5 ZLYR(I,L),RHO(I,L),RHOG(I,L),BETA(I,L),BETAG(I,L)
 N+6 ZSVP(1,L),CSVP(1,L)
 N+7 ZSVP(2,L),CSVP(2,L)
 N+M ZSVP(J,L),CSVP(J,L)

TITLE = USER NOTE. 80 CHARACTERS MAXIMUM.

NDIM = NUMBER OF DIMENSIONS.

FRQ = FREQUENCY (HZ)

ZS = SOURCE DEPTH

C0 = REFERENCE SOUND SPEED. IF C0 = 0.0, C0 IS SET TO AVERAGE SPEED IN FIRST LAYER.

ISF = STARTING FIELD FLAG.

0 = GAUSSIAN.

1 = USER FIELD.

2 = GREENS STARTER.

RA = HORIZONTAL RANGE FROM SOURCE TO STARTING FIELD. RA IS SET TO 0.0 IF ISF = 0.

ZA = DEPTH OF STARTING FIELD AT RANGE RA. IF ZA = 0.0, ZA IS SET TO MAX DEPTH OF
 BOTTOM LAYER IN FIRST PROFILE. IF IYPEB = 2 OR 3 AND ZA = 0.0, ZA IS SET TO
 (4/3)*MAX DEPTH OF BOTTOM LAYER. IF IYPEB = 3 AND ZA NOT ZERO, THE
 ARTIFICIAL BOTTOM LAYER IS EXTENDED TO ZA METERS PROVIDED THAT ZA IS
 GREATER THAN OR EQUAL TO MAX DEPTH OF BOTTOM LAYER IN FIRST PROFILE.

N = NUMBER OF EQUISPACED RECEIVERS IN STARTING FIELD. IF N = 0, N IS SET SO THAT THE
 RECEIVER DEPTH INCREMENT IS EQUAL TO 1 METER. IF N IS GREATER THAN MXN N
 IS SET TO MXN.

IHNK = HANKEL FUNCTION FLAG. IHNK = 0, DON'T USE HANKEL FUNCTION.

IHNK = 1, DIVIDE STARTING FIELD BY HANKEL FUNCTION, THEN MULTIPLY THE SOLUTION
 FIELD BY HANKEL FUNCTION BEFORE COMPUTING PROPAGATION LOSS. IF
 STARTING FIELD IS GAUSSIAN, IHNK SHOULD BE SET TO 0. IF STARTING FIELD IS
 ELLIPTIC, IHNK SHOULD BE SET TO 1.

ITYPES = TYPE OF SURFACE

0 - PRESSURE RELEASE. SCON3D SETS SURY AND SURX = 0.0

1 - USER SUPPLIES SURFACE CONDITION. SEE SUBROUTINE USCON3D.

2 - SPARE.

ITYPEB = TYPE OF BOTTOM

- 0 - PRESSURE RELEASE. BCON3D SETS BOTY AND BOTX = 0.0
- 1 - USER SUPPLIES BOTTOM CONDITION. SEE SUBROUTINE UBCON3D.
- 2 - SPARE.
- 3 - ABSORBING LAYER INTRODUCED - FLAT BOTTOM
- 4 - SPARE

ITYPPW = TYPE OF PORT SIDEWALL BOUNDARY CONDITION

- 0 - FIELD ALONG PORT SIDEWALL IS SET TO 0.0
- 1 - USER SUPPLIED. SEE SUBROUTINE UPORT3D.
- 2 - MODEL GENERATES 2D SOLUTION IF NDIM = 3.

ITYPSW = TYPE OF STARBOARD SIDEWALL BOUNDARY CONDITION

- 0 - FIELD ALONG STARBOARD SIDEWALL IS SET TO 0.0
- 1 - USER SUPPLIED. SEE SUBROUTINE USTBD3D.
- 2 - MODEL GENERATES 2D SOLUTION IF NDIM = 3.

FLDW = WIDTH OF FIELD IN DEGREES. IGNORED IF NDIM = 1.

NSEC = NUMBER OF SECTORS IN FIELD. IGNORED IF NDIM = 1. NUMBER OF SOLUTIONS =
NSOL = NSEC+1.

RMAX = MAXIMUM RANGE OF SOLUTION

DR = RANGE STEP. IF DR = 0, DR IS SET TO 1 METER. IF BOTTOM OF PROBLEM IS NOT FLAT,
DR IS RECOMPUTED SO THAT MAX DEPTH IS EITHER INCREMENTED OR
DECREMENTED BY DZ. SOLUTION IS COMPUTED EVERY DR METERS.

WDR = RANGE STEP AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. IF WDR NOT 0, AN OUTPUT
DISK FILE IS ASSIGNED. WDR IS ROUNDED TO NEAREST DR.

WZ1 = FIRST RECEIVER DEPTH AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK.

WZ2 = LAST RECEIVER DEPTH AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK.

WDZ = DEPTH INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. ROUNDED TO
NEAREST DZ.

WDTH = AZIMUTHAL INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. ROUNDED TO
NEAREST DTH.

PDR = RANGE STEP AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST DR.

PDZ = DEPTH INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST DZ.

PDTH = AZIMUTHAL INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST
DTH.

ISFLD = 0 - DON'T PRINT STARTING FIELD.

= 1 - PRINT STARTING FIELD.

ISVP = 0 - DON'T PRINT SOUND VELOCITY PROFILE.

= 1 - PRINT SOUND VELOCITY PROFILE.

IBOT = 0 - DON'T PRINT BOTTOM DEPTHS.

= 1 - PRINT BOTTOM DEPTHS.

DOUGRA = RANGE AT WHICH TO SWITCH FROM CRANK-NICOLSON METHOD TO DOUGLAS METHOD. IF DOUGRA = 0, USE CRANK-NICOLSON METHOD ONLY. SUGGESTED VALUE IS 5000 METERS.

NDIV = IF DOUGRA NE 0, N IS DIVIDED BY NDIV RESULTING IN ONLY N/NDIV SOLUTIONS IN DEPTH. SPEED UP IS NDIV TIMES. SUGGESTED VALUE IS 5.

U1-U12 = USER VARIABLES - REAL, SINGLE PRECISION. SEE HARVARD SUBROUTINE HARVARD.F FOR EXAMPLE.

KBOT = BOTTOM PROFILE FLAG.

= 0 - BOTTOM PROFILE IN INPUT RUNSTREAM.

= NOT ZERO. PROFILE IS SUPPLIED BY SUBROUTINE UBOTTOM. USER WRITES UBOTTOM. IF NSOL IS LARGE, UBOTTOM IS PREFERRED METHOD OF INPUT. BOTTOM PROFILE AT LEFTMOST SECTOR BOUNDARY.

R1,Z1 = RANGE AND DEPTH OF WATER.

R2,Z2 = ETC.

-1,-1 = MARKS THE END OF THIS BOTTOM PROFILE.

RSVP = RANGE OF SOUND SPEED PROFILES.

KSVP = SVP FLAG.

= 0 - SOUND SPEED PROFILES IN INPUT RUNSTREAM.

=NOT ZERO. PROFILE (LINES N+4 THRU N+M) IS SUPPLIED BY USER. USER WRITES SUBROUTINE USVP3D. KSVP MAY BE USED IN COMPUTED GOTO STATEMENT TO TRANSFER CONTROL IN USVP3D. IF NSOL IS LARGE, USVP3D IS PREFERRED METHOD OF INPUT.

NLYRS(L) = NUMBER OF LAYERS. IF ITYPEB = 3, PROGRAM INSERTS AN ARTIFICIAL LAYER AND INCREMENTS NLYRS(L) BY 1. SEE NOTE 2.

ZLYR(I,L) = MAX DEPTH OF LAYER I IN PROFILE.

RHO(I,L) = DENSITY IN LAYER I (G/CM**3).

RHOG(I,L) = DENSITY GRADIENT IN LAYER I (G/CM**3/M).

BETA(I,L) = ATTENUATION IN LAYER I (DB/WAVELENGTH). IF BETA(I,L) IS NEGATIVE, ATTENUATION IS COMPUTED.

BETAG(I,L)= ATTENUATION GRADIENT IN LAYER I (DB/WAVELENGTH/M).

ZSVP(1,L) = DEPTH TO TOP OF LAYER I

CSVP(1,L) = SPEED OF SOUND AT TOP OF LAYER I

ZSVP(J,L) = DEPTH TO BOTTOM OF LAYER I

CSVP(J,L) = SPEED OF SOUND AT BOTTOM OF LAYER I IF ONLY ONE SVP INPUTTED, IT IS USED THRU ENTIRE PROBLEM. IF MORE THAN ONE SVP INPUTTED, LAST SVP IS USED THRU REMAINDER OF PROBLEM.

4. 本論文で想定する音源

4.1. 地震探査の概要

地震探査は海底に向けて発振した音波が海底下の構造によって反射・屈折し再び海面まで伝搬したものを、曳航するハイドロフォンアレイや海底地震計で受波し、受波信号を解析することで海底下を可視化する探査手法である (Gisiner, 2016; 海洋音響学会, 2004)。探査は主に地殻構造の科学的調査や石油・天然ガス等の海底下資源の賦存状況の把握を目的として実施される。探査の際には、まず広域調査として二次元探査によって探査海域を絞り込み、次に三次元探査によって詳細な探査を行うことが一般的である (JOGMEC, 2014)。

音源は、海水と海底下の目的深度まで到達した後に再び海面のストリーマーカーケーブルまで十分なエネルギーを保った状態で戻ってくる音波を発振する必要がある。そのため、圧搾空気を放出することで大出力の低周波短パルス波を発振することができるエアガンが最も一般的な音源として使用されている。Table 4.1 に 2 次元探査、3 次元探査の際の一般的な探査期間および音源の音圧レベル、1 日の発振数、使用周波数帯域を表に示す (NPC, 2011)。

Table 4.1 地震探査の概要 (NPC, 2011 より引用)

運用方法	探査期間	音圧レベル [dB re 1μPa at 1m]	発振数 [shots / day]	周波数 [Hz]
2 次元	28 日-1 年	215-230	4320-8640	10-10000
3 次元	2 ヶ月-3 年	230-255	4320-8640	10-10000

4.2. 地震探査が海洋生物に与える影響

4.2.1. 行動阻害

地震探査によって発生する人為雑音は、海棲ほ乳動物のなかでも特にヒゲクジラが摂餌や繁殖行動、およびその他の生物学的に不可欠な行動の際に使用する周波数帯域と一致しており (Clark *et al.*, 2009)、ヒゲクジラの環境に対する認知能力や行動に影響を及ぼしていることが懸念されている (NRC, 2003)。海棲ほ乳動物の音に対する反応行動は、種、個体の成熟度、経験、社会行動 (摂食や繁殖等)、時期等の要因に依存する。ホッキョククジラは、ビューフォート海を回遊する際に地震探査実施海域から数 10km 回避する方向に経路を変更することが知られている (Richardson *et al.*, 1999)。一方で、ホッキョククジラが、夏季の摂餌の際には地震探査による人為雑音を背景雑音より 40 dB 大きい音圧レベルで受波しても摂餌を中断しなかったという観測結果もある (Richardson *et al.*, 1995)。

4.2.2. マスキング

地震探査に使用される低周波音波は海中を効率的に伝搬する。中大西洋岸における数年間におよぶ背景雑音の観測結果では、3000 km 以上離れた地震探査による人為雑音が、背景雑音よりも高いレベルで複数回検出された (Nieukirk *et al.*, 2004)。地震探査音源は、10-12 秒毎に発振されるため、低周波の「断続的」音源に分類される (Southall *et al.*, 2007)。エアガンから発振される音波は、発振時は持続時間が非常に短いインパルス音であるが、長距離 (500- 3000 メートル) を伝搬することによって持続時間が延伸し 10 Hz 以下の非常に低い周波数に変化する (NPC, 2011)。そのため、理論的には、受波点において前のパルスが完全に減衰していない状態で次のパルス波を受波する可能性があるため、連続音とみなされることもある (Clark *et al.*, 2009)。その場合、マスキングを引き起こす可能性がある。

4.2.3. 聴覚および物理的障害

地震探査による人為雑音は一時的及び永久的な生理的難聴を引き起こす可能性がある。さらにエアガンのパルス波が持つ非常に短い持続時間と大きいピーク音圧を考えると、その他の傷害を与える可能性もある。エアガンのパルス波による傷害または行動阻害によってストランディングを引き起こす可能性があるという仮説も存在する (Hildebrand, 2005)。

4.2.4. 長期的な個体数への影響

ブラジル沿岸の地震探査が海棲ほ乳動物の個体数の減少を引き起こした可能性を示す研究結果が 1 例報告されている (Parente *et al.*, 2007)。

4.3. 本研究で想定する地震探査音源

本研究では地震探査音源として、2017 年に完成した JAMSTEC の海底広域研究船「かいめい」に搭載されているエアガンを想定し、中心周波数 50 Hz、ピーク音圧レベル 270 dB re 1 μ Pa at 1 m とし、音源深度は実運用を想定し 6 m とした。これらは「かいめい」のエアガンの製造元である Bolt 社によるシミュレーション結果である (Table 4.2, Fig. 4.1, 4.2)。

Table 4.2 本研究で想定したエアガンのパラメータ

パラメータ	シミュレーション値
エアガン数	44 個
総容量	10600.0 cu. In
SPL _{peak} (peak-to-peak)	270 [dB re 1 μ Pa at 1 m]
.SPL _{peak} (zero-tp-peak)	264 [dB re 1 μ Pa at 1 m]
SPL _{rms}	243 [dB re 1 μ Pa at 1 m]

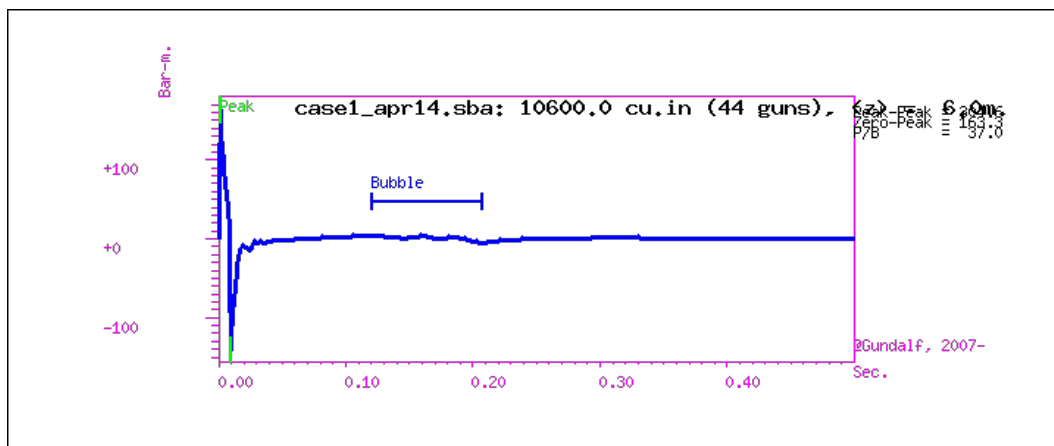


Fig. 4.1 JAMSTEC の海底広域研究船「かいめい」搭載エアガンの時間領域波形

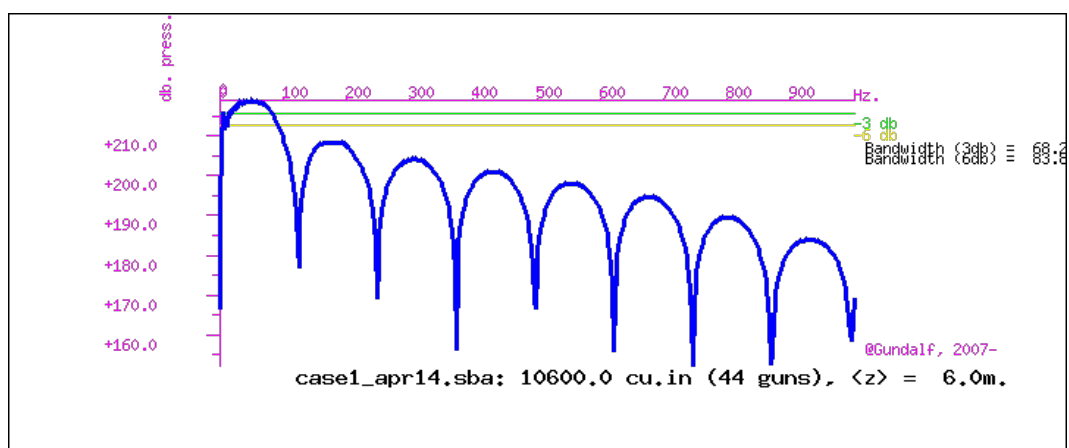


Fig. 4.2 JAMSTEC の海底広域研究船「かいめい」搭載エアガンの周波数スペクトル

5. シミュレーション概要

5.1. シミュレーション海域・時期

シミュレーションを行った測線を Fig. 5.1 に示す．地震探査が盛んに行われている伊豆小笠原海溝周辺において A 点を始点，ヒゲクジラ類の繁殖域である小笠原諸島付近の C 点を終点とあうる．測線の全長は 600 km である．Fig. 5.1 中に A-C 点それぞれに使用した Argo データの夏季・冬季の観測日を示す．実際の夏季の Argo データの位置は異なるが，今回は冬季 Argo データの位置を基準とする．

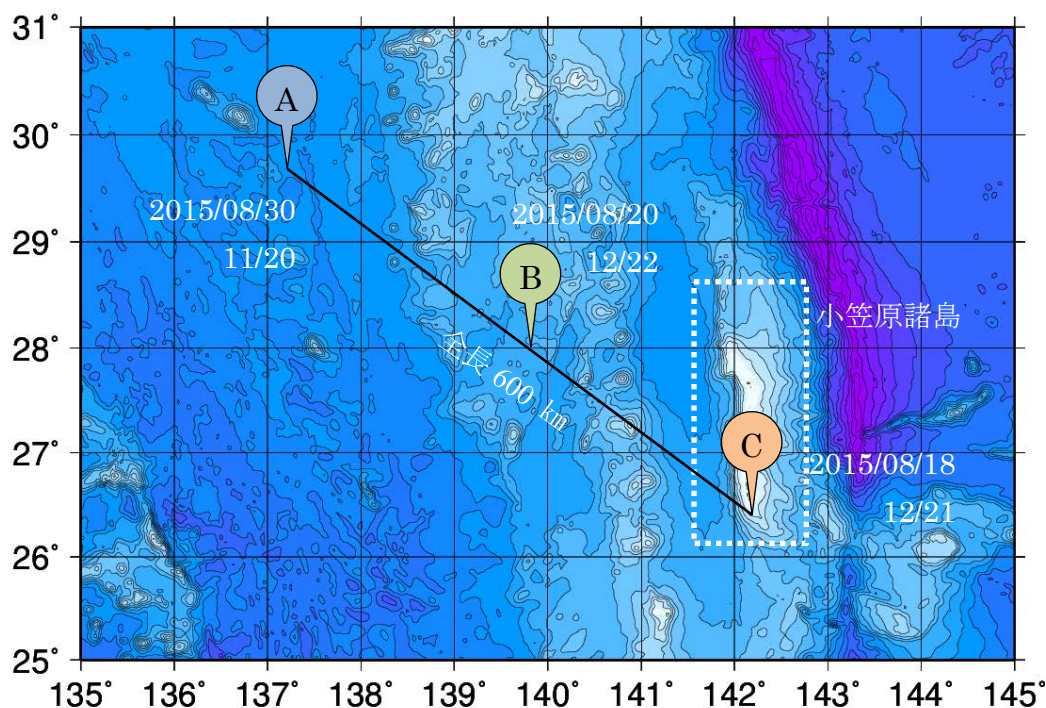


Fig. 5.1 シミュレーション海域

5.2. CTD データと音速プロファイル

5.2.1. LEVITUS データ

LEVITUS データ (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS/>) とは，米国海洋データセンター (National Oceanographic Data Center: NODC) などが集めた海洋観測資料を用いて，S. Levitus が作成した水温・塩分・溶在酸素のデータセットである．水平方向には 1 度メッシュ，鉛直方向には最多で 5500 m までの 33 層のメッシュで分割されている．1 度メッシュでデータが存在しているため水平方向のデータ数は十分だが，統計データであるため表層付近の季節性的水温変動の影響が反映されていない．

5.2.2. Argo データ

Argo データ (http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/ancient/argo/index.html) とは、2000 年に始動した Argo 計画によって世界中の海洋に 300 km メッシュで展開された約 3500 台の Argo フロートが取得する圧力・水温・塩分のデータである。Argo フロートは 10 日間の周期で深度 0-2000 m の水温、塩分、圧力の鉛直プロファイルを観測し、海面に浮上した際に陸上の基地局に位置と観測データを送信する (Fig. 5.2)。受信後は明らかにエラーであると判別できるデータが自動で取り除かれ、24 時間以内に公開される。そのため、Argo システムを使用することで、細かな季節変動が反映された高精度なデータをほぼリアルタイムに取得することができる。よって Argo データは本研究で扱うリアルタイム性が求められる調査に使用するに適切であると考えられる。

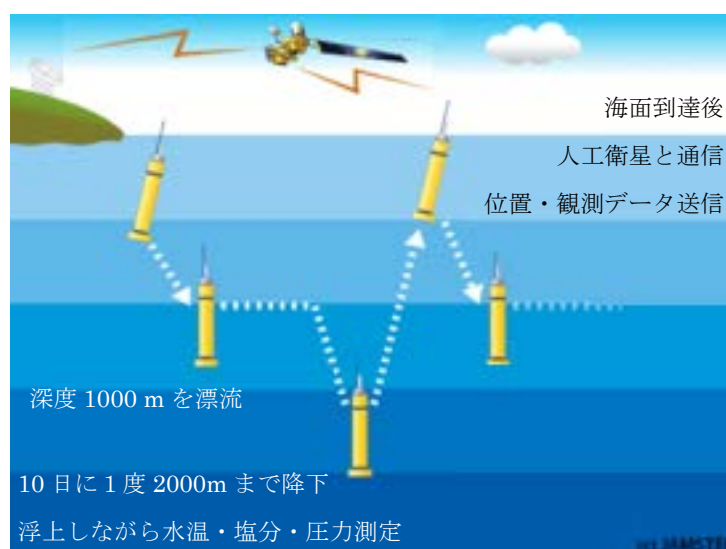


Fig. 5.2 Argo フロートの観測周期

5.2.3. 本研究で音速プロファイルを求めるために使用する CTD データ

各点における夏季と冬季の Argo データの詳細を Table 5.1 に示す。なお、Argo データの最大深度は 2000 m であるため、2000 m 以深は全ケースとも LEVITUS データを使用する。2000 m 以深は季節変動の影響をほとんど受けないため計算結果には影響を与えないと考えられる。

Table 5.1 使用した Argo データの詳細

	地点	観測日	フロート ID	緯度	経度
夏季	A	2015/08/30	2902941_57	30.606	136.543
	B	2015/08/20	2902523_39	28.992	140.181
	C	2015/08/18	2902518_47	26.608	143.120
冬季	A	2015/11/20	2902474_70	29.628	137.212
	B	2015/12/22	2902960_8	28.148	139.721
	C	2015/12/21	2901679_103	26.128	142.450

A–C 点の音速プロファイルを求めるために、各点の CTD データを以下の UNESCO の式 (Fofonoff, 1983) を使用して音速に変換する (<http://www.tsuchiya2.org/>).

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{\frac{3}{2}} + D(T, P)S^2$$

ここで、 T を水温[°C], S を実用塩分[psu], P を実用塩分[kg/cm³]とし、

$$\begin{aligned} C_w(T, P) = & (C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5) \\ & + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P \\ & + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 \\ & + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A(T, P) = & (A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4) \\ & + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P \\ & + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3 + A_{24}T^4)P^2 \\ & + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \end{aligned}$$

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P$$

$$D(T, P) = D_{00} + D_{01}P$$

Coefficients	Numerical values	Coefficients	Numerical values
C ₀₀	1402.388	A ₀₂	7.166E-5
C ₀₁	5.03830	A ₀₃	2.008E-6
C ₀₂	-5.81090E-2	A ₀₄	-3.21E-8
C ₀₃	3.3432E-4	A ₁₀	9.4742E-5
C ₀₄	-1.47797E-6	A ₁₁	-1.2583E-5
C ₀₅	3.1419E-9	A ₁₂	-6.4928E-8
C ₁₀	0.153563	A ₁₃	1.0515E-8
C ₁₁	6.8999E-4	A ₁₄	-2.0142E-10
C ₁₂	-8.1829E-6	A ₂₀	-3.9064E-7
C ₁₃	1.3632E-7	A ₂₁	9.1061E-9
C ₁₄	-6.1260E-10	A ₂₂	-1.6009E-10
C ₂₀	3.1260E-5	A ₂₃	7.994E-12
C ₂₁	-1.7111E-6	A ₃₀	1.100E-10
C ₂₂	2.5986E-8	A ₃₁	6.651E-12
C ₂₃	-2.5353E-10	A ₃₂	-3.391E-13
C ₂₄	1.0415E-12	B ₀₀	-1.922E-2
C ₃₀	-9.7729E-9	B ₀₁	-4.42E-5
C ₃₁	3.8513E-10	B ₁₀	7.3637E-5
C ₃₂	-2.3654E-12	B ₁₁	1.7950E-7
A ₀₀	1.389	D ₀₀	1.727E-3
A ₀₁	-1.262E-2	D ₁₀	-7.9836E-6

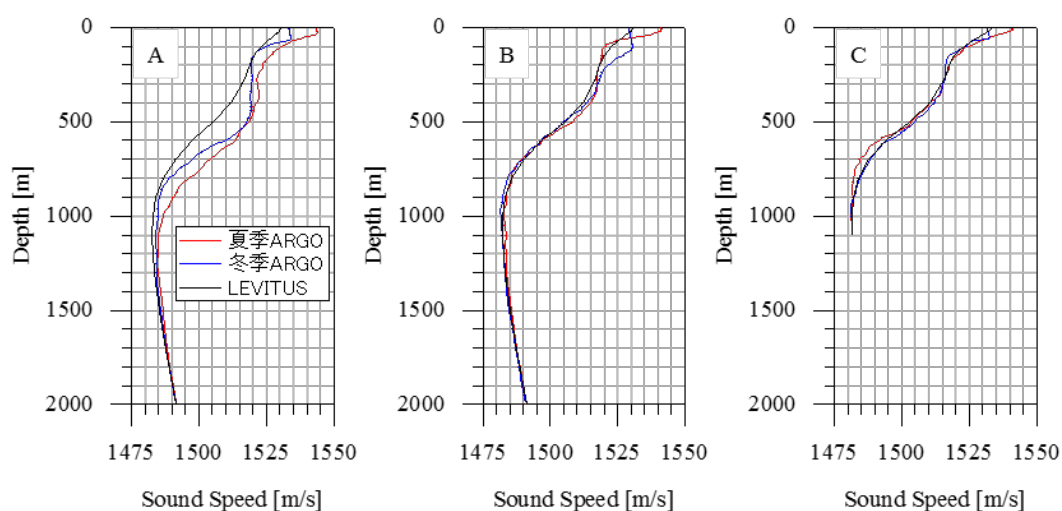


Fig. 5.3 A, B, C 点の音速プロファイル

5.3. 海底地形データ

海底地形データは KML ファイルを作成し、Google Earth に入力して得た (Fig. 5.4). Google Earth の測深値は、米国のスクリプス海洋学研究所や NOAA, 日本では JAMSTEC など世界各国の研究機関から提供されたものである (<https://www.google.com/earth/explore/showcase/ocean.html>). これらの海底地形を再現したシミュレーションを行うために、パラメータ入力点として、点 A-B 間に AB1-AB3 の 3 点、点 B-C 間に BC1-BC7 の 7 点を補間した. 補間点の音速プロファイルは音速が緯度方向に線形に変化すると仮定して A, B, C 点の音速プロファイルから求めた. また、夏季の A, B, C 点における音速プロファイルは基準としている冬季の Argo データ存在点にあわせて同様に求めた.

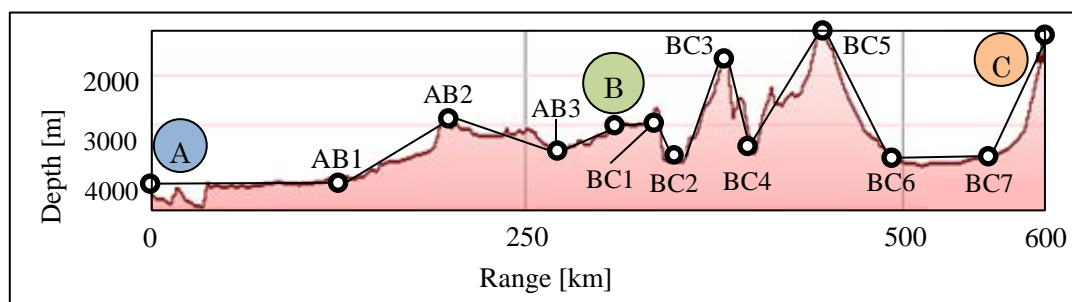


Fig. 5.4 測線下の海底地形

5.4. 海底質データ

海底質データは海洋情報研究センター (Marine Information Research center; MIRC) が公開している北西太平洋底質メッシュデジタルデータ (<http://www.mirc.jha.or.jp/products/finished/BMMDv1/>)

から求めた (Fig. 5.5). また, 海底質のパラメータは下記の Table 5.2 に示したものをを使用した.

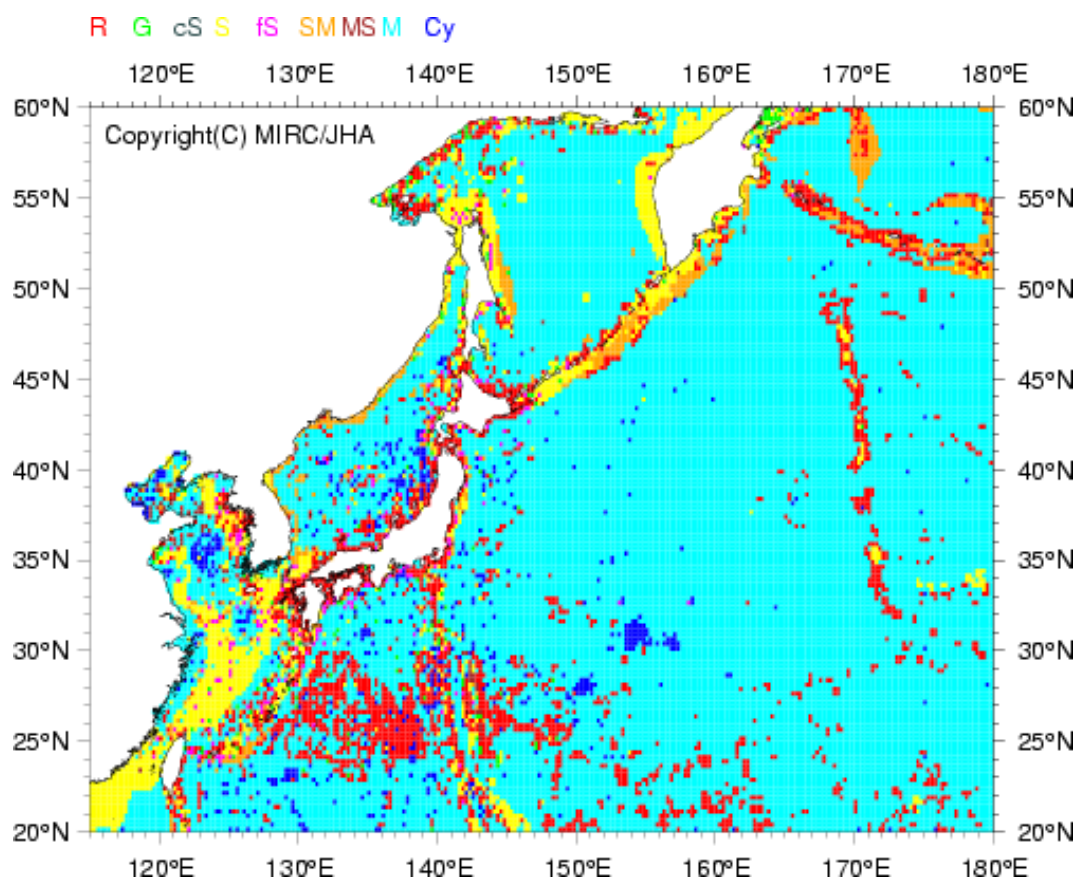


Fig. 5.5 北西太平洋の海底質分布

Table 5.2 海底質のパラメータ

Jensen (1994)と Xavier (2002)より引用

	Density [Kg/m ³]	Compressional wave speed [m/s]	Attenuation [dB/m/kHz]
砂泥粘土	1600	1560	0.80
砂	1900	1650	0.80
礫岩	2200	2400	0.20
玄武岩	2700	5250	0.10

5.5. シミュレーションケース

まず, 提案手法の有効性を検証するために, 同一測線において, 夏季と冬季の Argo データから求めた音速プロファイルを用いた音波伝搬シミュレーション (ケース (b), (c)), 従来手法である球面拡散モデル, および統計データである LEVITUS データ (ケース (a)) を用いて計算した人為雑音源から受波点までの音場を比較し, 季節性の水温変動が音波伝搬に与える影響を調べた.

- (a) LEVITUS データから求めた音速プロファイルのみを使用した場合
- (b) 夏季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルを使用した場合
- (c) 冬季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルを使用した場合

次に、ケース (b), (c) と、Argo データに加え海底地形データを使用したケース (d), (e) を、さらに Argo データと海底地形データに加え海底質データを使用したケース (f), (g) ととも比較を行い、海底地形および海底質が音波伝搬に与える影響を調べた。

- (d) 夏季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データを使用した場合
- (e) 冬季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データを使用した場合
- (f) 夏季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用した場合
- (g) 冬季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用した場合

最後に、ケース (f), (g) において、送波点が受波点 C の 100 km 手前の測線上に存在するケース (f-1), (g-1), また送波点が点 C に、受波点が送波点 C の 100 km 手前の測線上に存在するケース (f-2), (g-2) について、提案手法を用いた影響調査を行い、その結果から緩和距離を求め、将来に向けた影響緩和策の展望について考察した。

- (f-1) 夏季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用し、送波点が受波点 C の 100 km 手前の測線上に存在する場合
- (g-1) 冬季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用し、送波点が受波点 C の 100 km 手前の測線上に存在する場合
- (f-2) 夏季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用し、送波点が点 C に、受波点が送波点 C の 100 km 手前の測線上に存在する場合
- (g-2) 冬季 Argo データと大深度域 LEVITUS データから求めた音速プロファイルおよび海底地形データ・海底質データを使用し、送波点が点 C に、受波点が送波点 C の 100 km 手前の測線上に存在する場合

なお、受波深度はザトウクジラの潜水深度が最大 50 m 程度であることを考慮し、10 m、30 m、50 m とした。

6. シミュレーション結果

6.1. 提案手法の有効性の検証

提案手法の有効性を検証する。Fig. 6.1, 6.2, 6.3 に、ケース (a), (b), (c) の測線の横断面の伝搬損失 (TL) の分布および深度 10 m, 30 m, 50 m における距離方向の伝搬損失プロットを示した。各深度における距離方向の伝搬損失プロットとともに 3.1.7 伝搬損失 (Transmission Loss: TL) に記述した理想的な伝搬損失である球面拡散損失および円筒拡散損失のプロットを示した。

Fig. 6.1, 6.2, 6.3 から、理想的な拡散損失はどちらも実際の伝搬損失とは大きな差があることがわかる。この差を詳細にみるために、円筒拡散損失および球面拡散損失とケース (b), (c) で各深度における受波音圧レベル (Received Level: RL) をソーナー方程式 ($RL = SL - TL$) によって求め、差をとった。円筒拡散損失からケース (b) を減じたものを Fig. 6.4, 球面拡散損失からケース (b) を減じたものを Fig. 6.5, 同様に円筒拡散損失からケース (c) を減じたものを Fig. 6.6, 球面拡散損失からケース (c) を減じたものを Fig. 6.7 に示した。Fig. 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 から、受波深度が小さいほど、音源からの距離約 40 km 以降は受波点が音源から遠いほど、そして冬季より夏季の方が差が大きいことがわかる。このような結果となった原因を以下に考察する。地震探査では音波を真下に向けて送波するため、音源のごく近距離以外は、直接波は到達せず一度海底に反射した音波のみが到達する。海面付近の急な音速勾配によって海底からの反射波は海面付近に到達する前に屈折し、海面に近いほど伝搬損失が大きくなる。受波点が音源から遠いほど、到達する音波は海底反射を多く繰り返したものであり、海底損失によって伝搬損失が大きくなる。また、海面付近の音速勾配は、一般的に季節性の水温変動によって冬季よりも夏季の方が急であるため、海面付近まではより到達しづらくなる。そのため海面付近の伝搬損失は夏季の方が冬季よりも大きくなる。以上が、受波深度が小さいほど、受波点が音源から遠いほど、そして冬季より夏季の方が、理想的な拡散損失と実際の受波音圧レベルの差が大きいという結果をもたらした原因であると考えられる。音源からごく近距離を除いた距離数 km 以内では、直接波が到達しないため理想的な拡散損失によって求めた受波音圧レベルは過大評価となる。影響調査や緩和距離の設定の際に聴覚障害を引き起こす受波音圧レベルを閾値とした場合は、近距離の伝搬損失の計算に一般的に使用される球面拡散モデルを使用しても過大評価にはなるが、緩和距離は大きくても約 1.5 km と目視監視可能である。しかし行動障害を引き起こす受波音圧レベルを閾値とした場合、球面拡散モデルを使用すると緩和距離は確実に目視監視不可能なものになってしまう。この結果から、行動障害を対象とした影響調査や緩和距離の設定を行う場合、理想的な拡散モデルではなく、高精度な音波伝搬シミュレーションを行う必要があるといえる。

次に、Fig. 6.1, 6.2, 6.3 から、ケース (a), (b), (c) 間で伝搬損失に差があることがわかる。この差を詳細に見るために、各ケース間で各深度における受波音圧レベルをソーナー方程式によって求め、差をとった。ケース (c) からケース (b) を減じたものを Fig. 6.8, ケース (a) からケース (b) を減じたものを Fig. 6.9, そしてケース (a) からケース (c) を減じたものを Fig. 6.10 に示した。Fig. 6.8, 6.9, 6.10 では距離約 100 km 以降で値のばらつきが大きく、比較が困難であるため、各ケース、各深度において区間 50 km の移動平均を計算することによって収束帯の発生に

よる伝搬損失の周期的な増減の影響を取り除いた。これらの差をとったものを同様に、ケース (c) からケース (b) を減じたものを Fig. 6.11, ケース (a) からケース (b) を減じたものを Fig. 6.12, そしてケース (a) からケース (c) を減じたものを Fig. 6.13 に示した。Fig. 6.8, 6.9, 6.10 から、音源から数 km 以内は特に差が大きく、各ケース間の差は最大で約 20 dB である。また、Fig. 6.11 から、受波深度が小さいほど夏季と冬季の差が大きいことがわかる。これは上述したように、季節性的水温変動による海面付近の音速勾配の変化が原因であると考えられる。さらに、Fig. 6.11, 6.12, 6.13 から、全体として伝搬損失は大きい順に (b), (c), (a) となっていることがわかる。ここで、Fig. 5.3 を見ると、LEVITUS データ、夏季 Argo データ、冬季 Argo データから求めた音速プロファイル間には明らかな差がある。この差は季節性的水温変動によるものであるため、A, B, C 点 と緯度の高さの順に大きい。また、最も差が大きい A 点の音速プロファイルは全深度において、音速が小さい順に LEVITUS データ、冬季の Argo データ、夏季の Argo データとなっており、受波音圧レベルの大きい順と一致する。この結果から、今回のように送受波点を海面付近に設定する場合、音波伝搬は季節性的水温変動による海面付近の音速構造の影響を受けており、行動阻害を対象とした影響調査や緩和距離の設定を行う場合、対象時期によって結果が大きく異なることを示している。したがって、行動阻害を対象とした影響調査や緩和距離の設定のために音波伝搬シミュレーションを行う場合は統計データではなく Argo データを使用することが有効であるといえる。

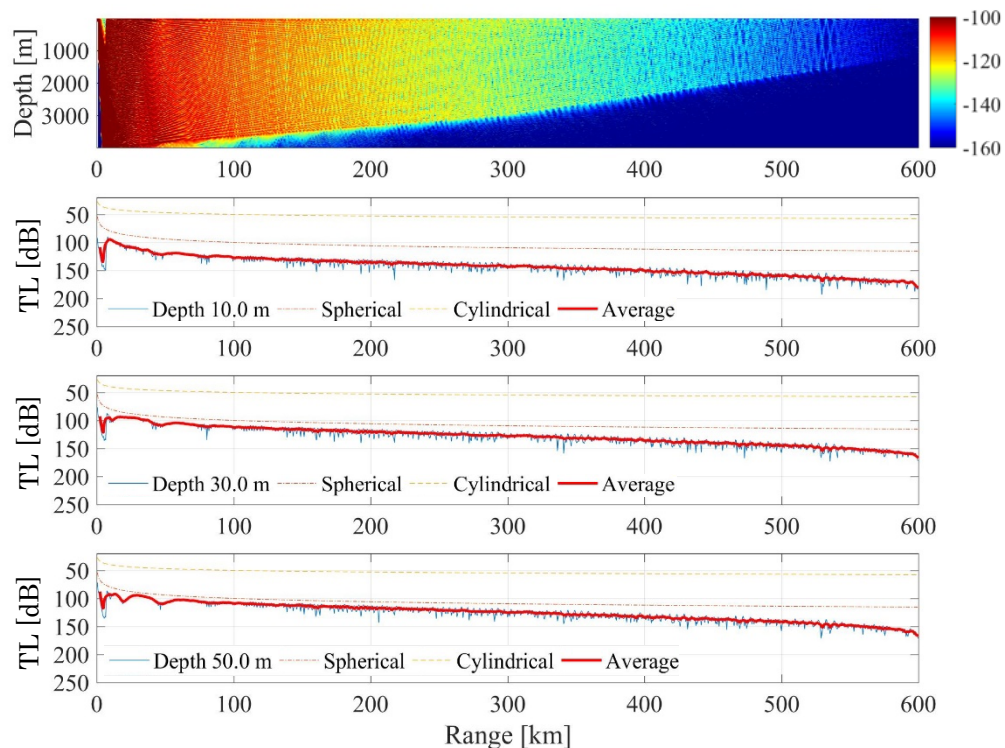


Fig. 6.1 ケース (a) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

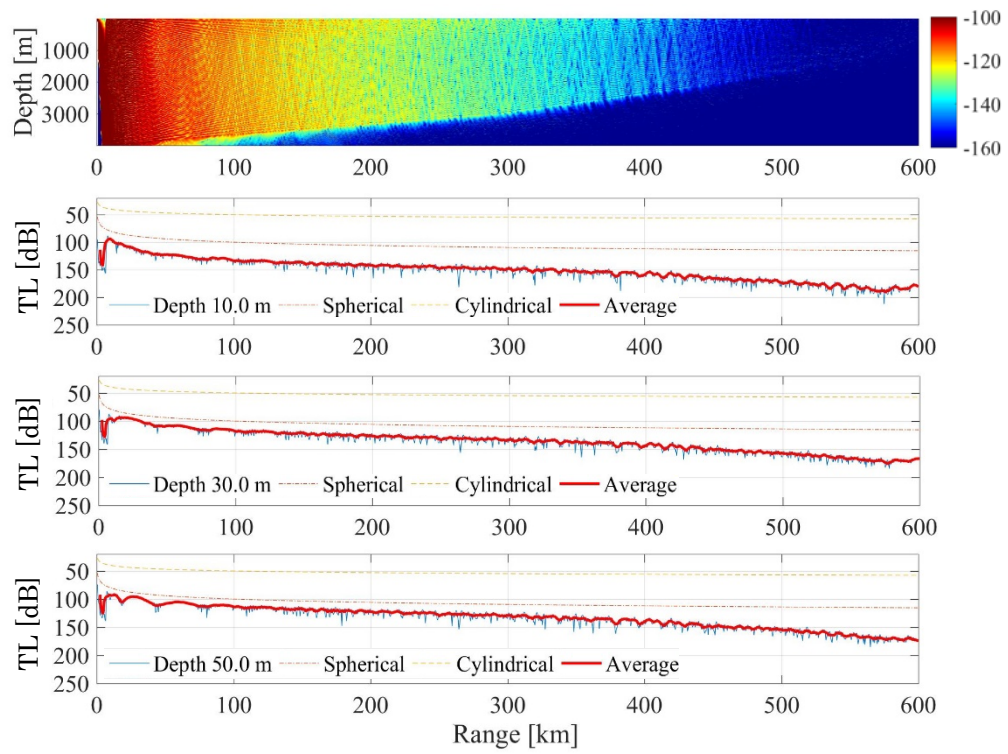


Fig. 6.2 ケース (b) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

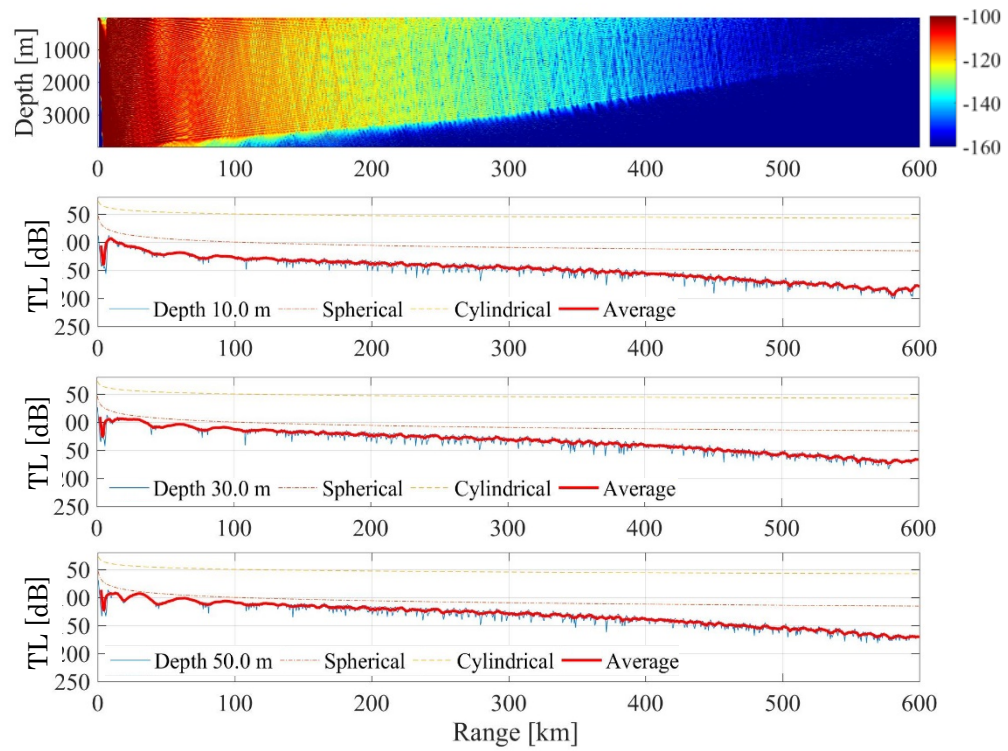


Fig. 6.3 ケース (c) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

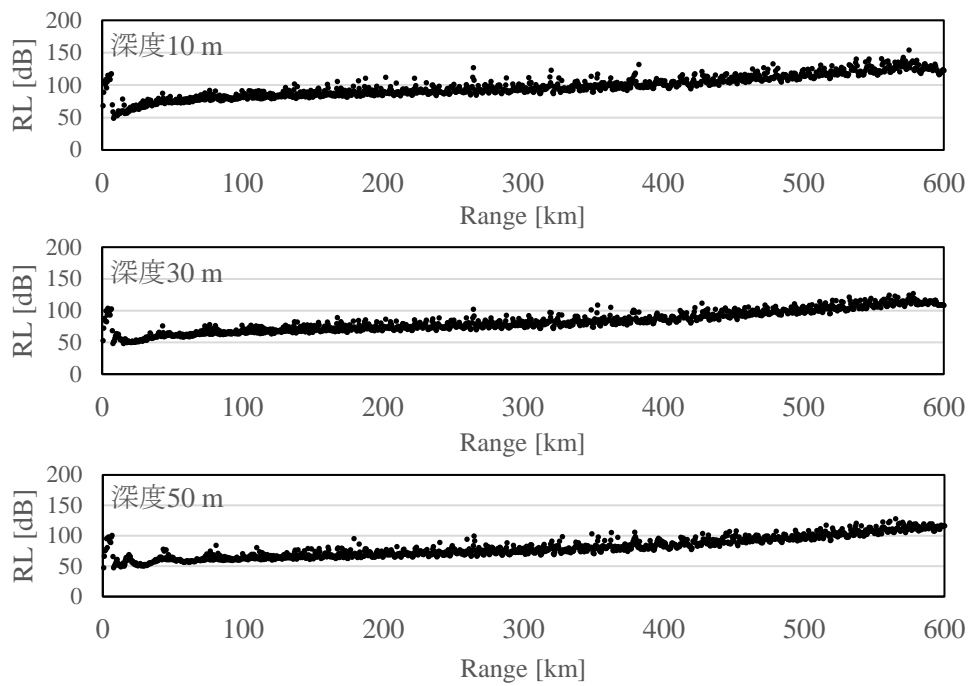


Fig. 6.4 円筒拡散損失とケース (b) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

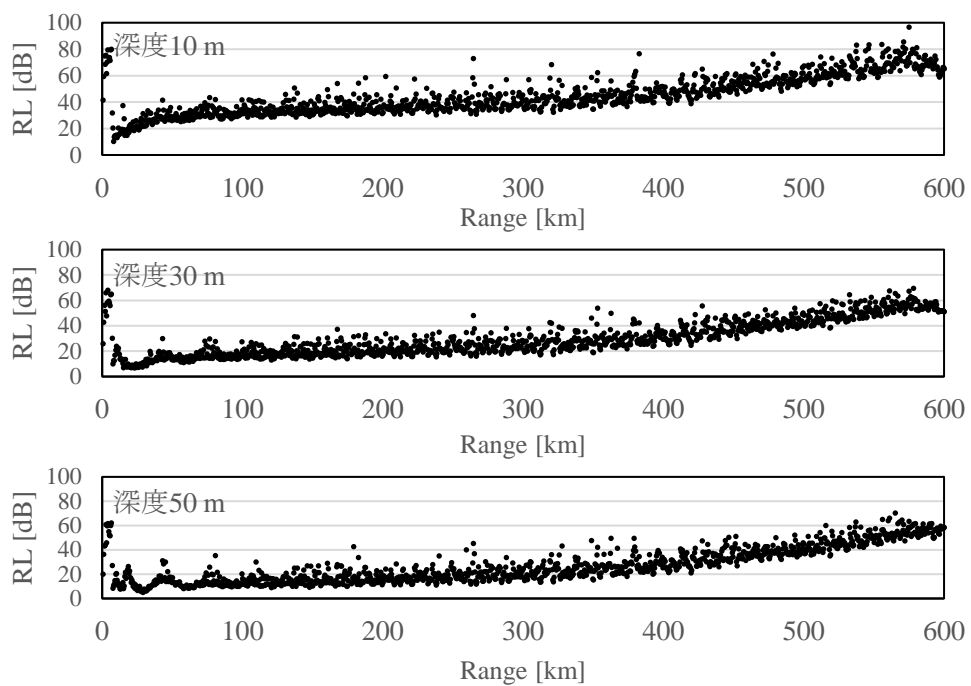


Fig. 6.5 球面拡散損失とケース (b) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

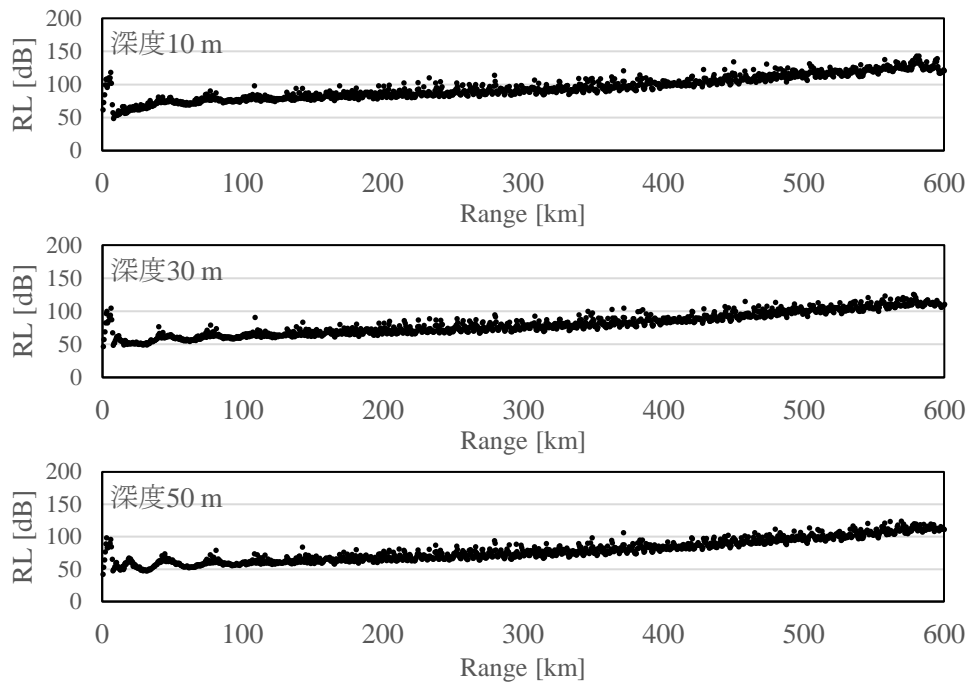


Fig. 6.6 円筒拡散損失とケース (c) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

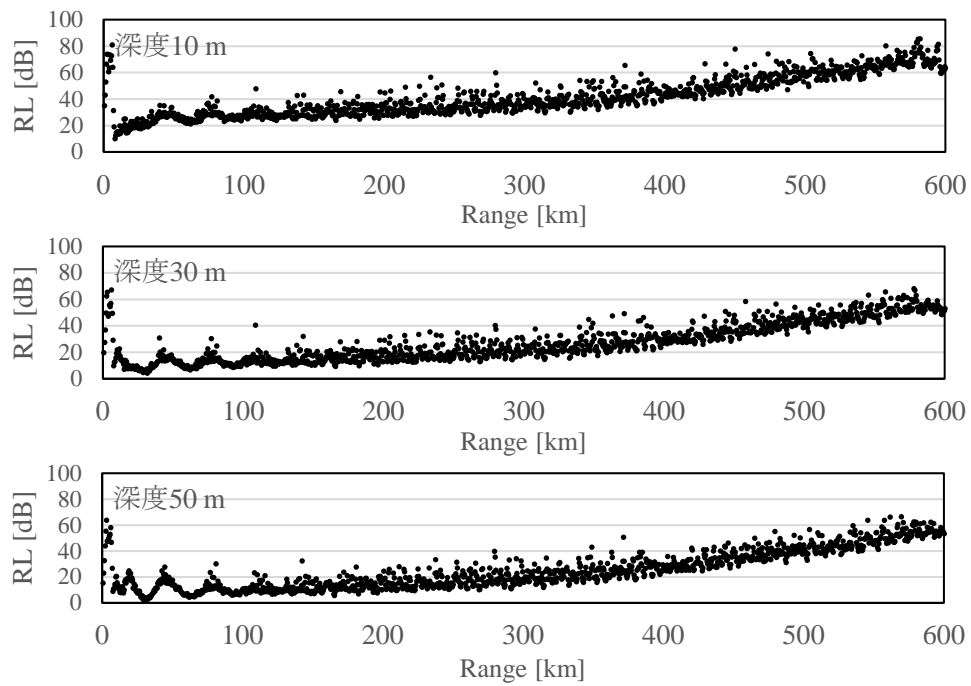


Fig. 6.7 球面拡散損失とケース (c) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

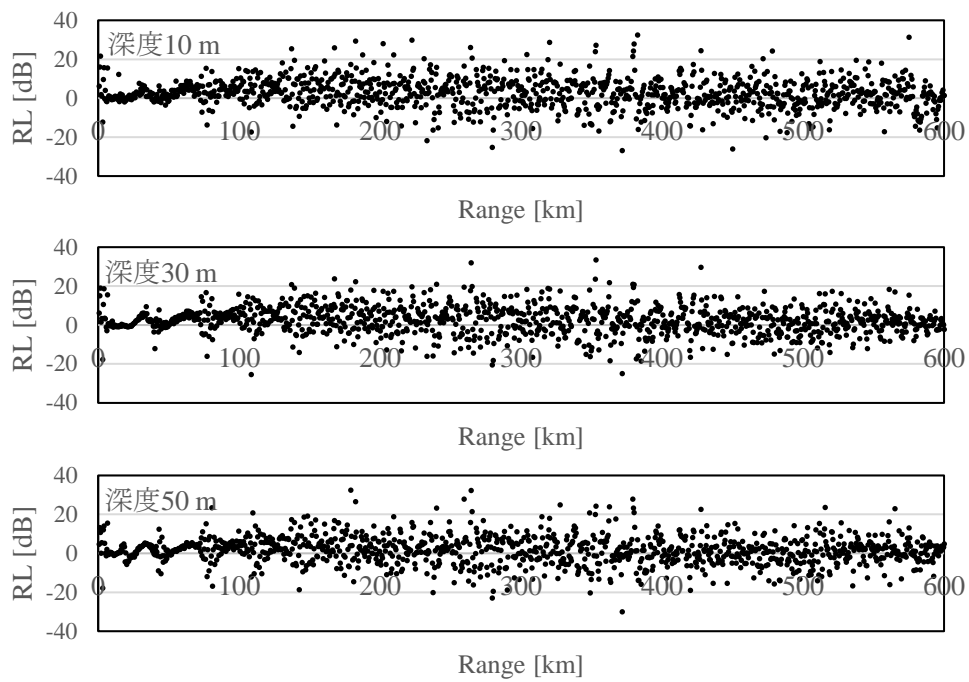


Fig. 6.8 ケース (c) とケース (b) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

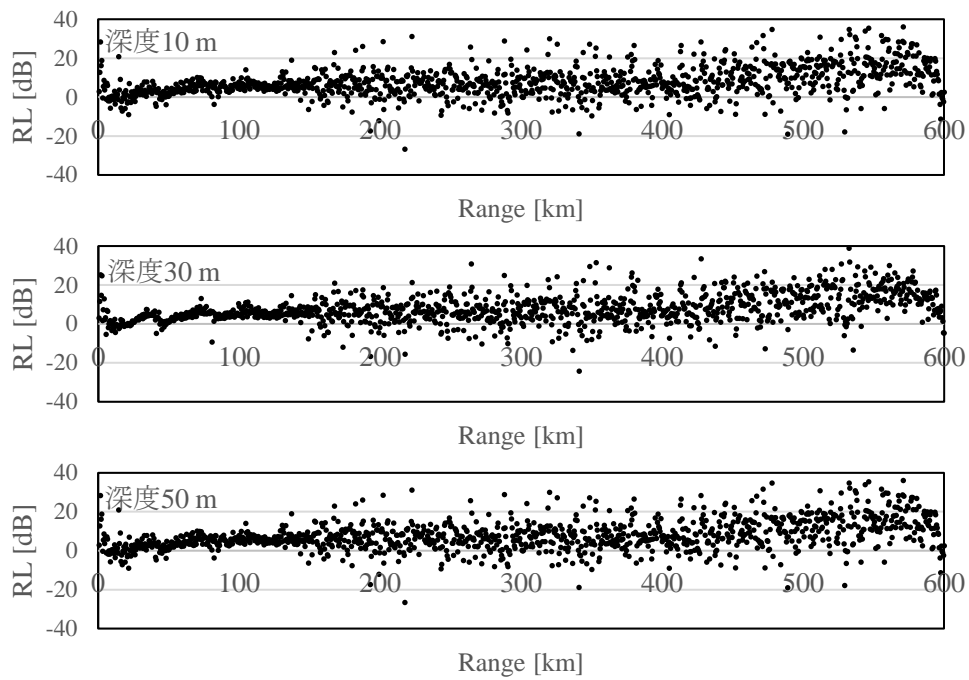


Fig. 6.9 ケース (a) とケース (b) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

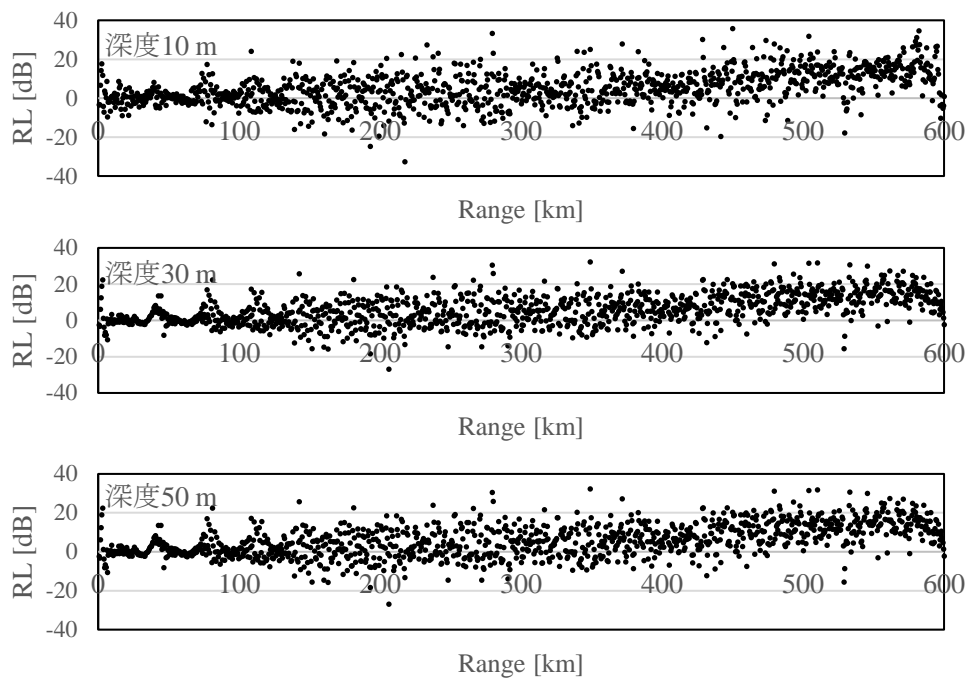


Fig. 6.10 ケース (a) とケース (c) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

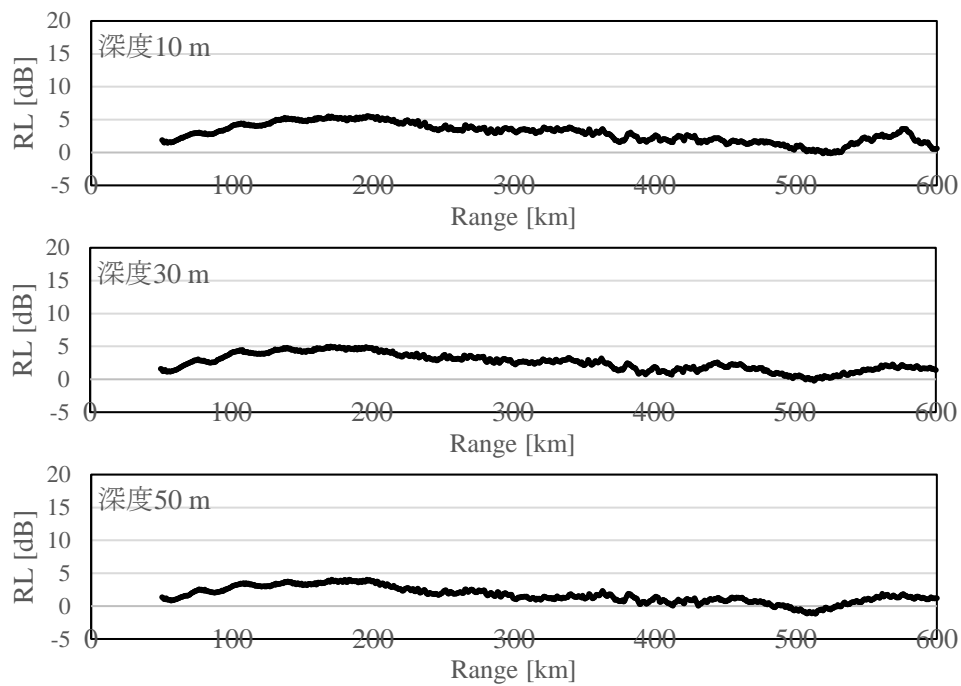


Fig. 6.11 ケース (c) とケース (b) の RL の 50 km移動平均の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

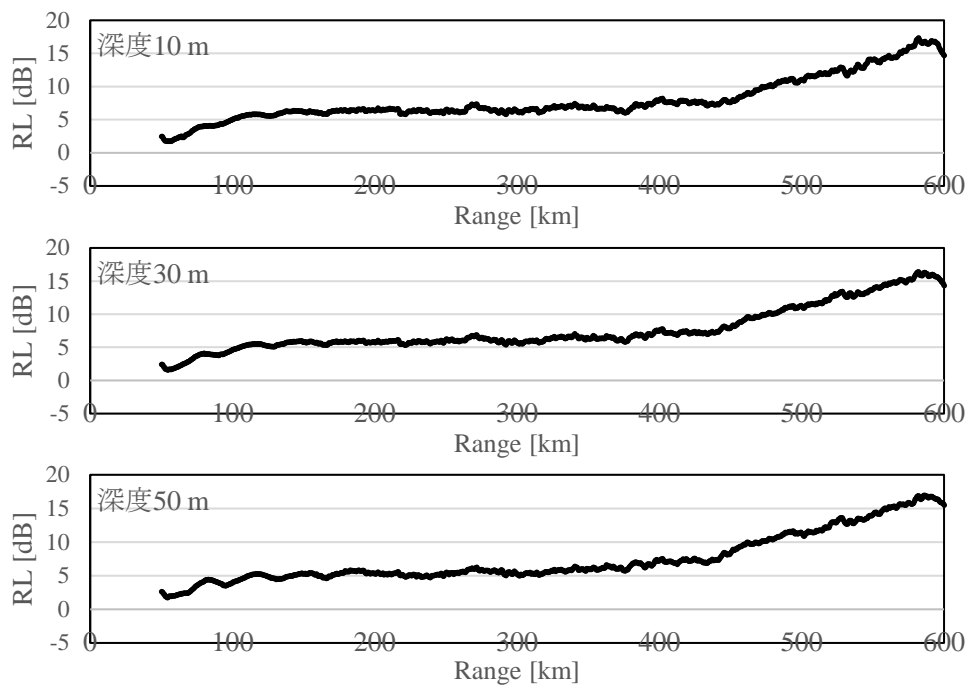


Fig. 6.12 ケース (a) とケース (b) の RL の 50 km移動平均の差
(受波深度 10m, 30m, 50m)

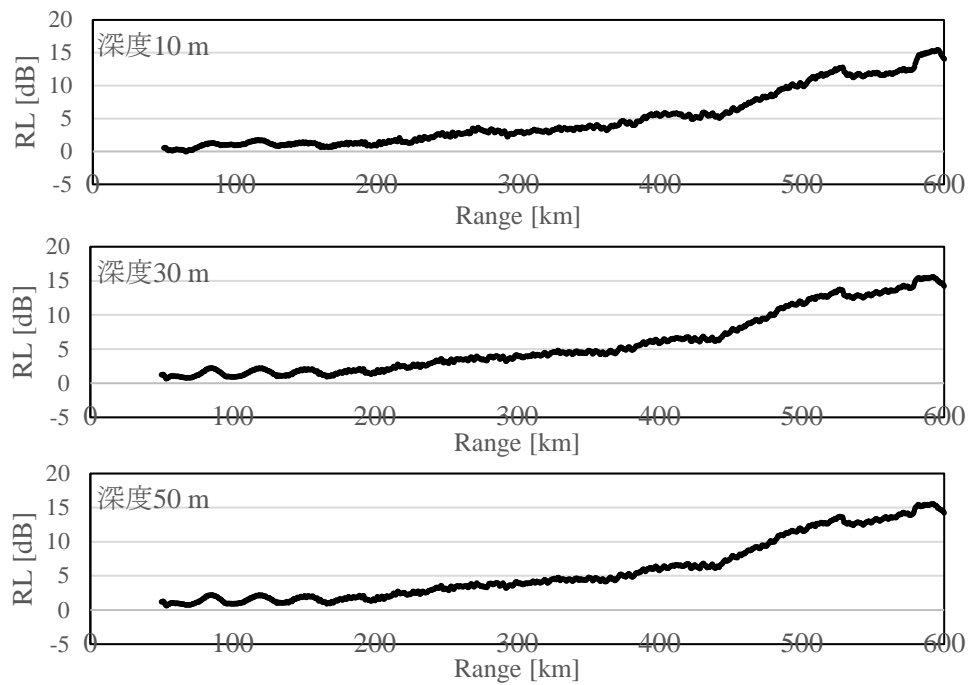


Fig. 6.13 ケース (a) とケース (c) の RL の 50 km移動平均の差
(受波深度 10m, 30m, 50m)

6.2. 海洋環境基礎データが音波伝搬に与える影響の調査

海洋環境基礎データが音波伝搬に与える影響を調査する。6.1 に、季節性の水温変動が音波伝搬に与える影響について記述したので、本節では海底地形・海底質のみについて記述する。

まず、海底地形が音波伝搬に与える影響について記述する。Fig. 6.14, 6.15 にケース (d), (e), の測線の横断面の伝搬損失 (TL) の分布および深度 10 m, 30 m, 50 m における距離方向の伝搬損失プロットを示した。各深度における距離方向の伝搬損失プロットとともに理想的な伝搬損失である球面拡散損失および円筒拡散損失のプロットを示した。Fig. 6.14, 6.15 を Fig. 6.2, 6.3 と比較すると明らかな差があることがわかる。ケース (b), (c) では、音波は単調に海底反射と海面反射を繰り返しながら伝搬するが、ケース (d), (e) では、距離約 380 km の海山を通過した後ははっきりとした収束帯が形成され、その後も収束帯を形成し続けることによって、ケース (b), (c) よりも海底反射・海面反射による損失を受けずに伝搬する。この差を詳細にみるために、ケース (b), (c) とケース (d), (e) で各深度における受波音圧レベルをソーナー方程式によって求め、差をとった。ケース (d) からケース (b) を減じたものを Fig. 6.16, ケース (e) からケース (c) を減じたものを Fig. 6.17 に示した。各ケース、各深度すべてにおいて、距離 0 から約 380 km までは差は平均 5 dB 以下程度だが、収束帯の発生区間では差は最大で約 30 dB 近くにもなる。また、はっきりとした収束帯が形成されている区間では受波深度が大きいほど差が大きく、すなわち音波伝搬が海底地形から受ける影響が大きいことがわかる。これは、海面付近の音速勾配によって収束帯は海面付近に到達する前に屈折し、海面に近いほど伝搬損失が大きくなるためであると考えられる。クジラの生息地は浅海域であり、島弧の近くなど収束帯が形成されやすい環境であることをふまえると、この結果から、行動阻害を対象とした影響調査や緩和距離の設定のために音波伝搬シミュレーションを行う場合は正確な海底地形の把握が必要であるといえる。

次に、海底質が音波伝搬に与える影響について記述する。Fig. 6.18, 6.19 にケース (f), (g) の測線の横断面のシミュレーションで入力した底質の分布と伝搬損失 (TL) の分布、深度 10 m, 30 m, 50 m における距離方向の伝搬損失プロットを示した。各深度における距離方向の伝搬損失プロットとともに理想的な伝搬損失である球面拡散損失および円筒拡散損失のプロットを示した。Fig. 6.18, 6.19 を Fig. 6.16, 6.17 と比較すると明らかな差があることがわかる。ケース (d), (e) に対してケース (f), (g) では、距離約 380 km の海山を通過した後に形成される収束帯が、より大きい音圧レベルを保ったまま伝搬する。この差を詳細にみるために、ケース (d), (e) とケース (f), (g) で各深度における受波音圧レベルをソーナー方程式によって求め、差をとった。ケース (f) からケース (d) を減じたものを Fig. 6.20, ケース (g) からケース (e) を減じたものを Fig. 6.21 に示した。各ケース、各深度すべてにおいて、距離 0 から約 380 km までは差は平均 5 dB 以下程度だが、収束帯の発生区間では明らかな差があり、距離約 480 km で差は最大となり、約 30 dB 近くになる。これは、ケース (d), (e) の全区間の底質として設定している砂泥粘土に対し、ケース (f), (g) では玄武岩、礫岩と吸収係数が小さい底質が分布していることで、より海底損失を受けずに伝搬するためであると考えられる。また、はっきりとした収束帯が形成されている区間では受波深度が大きいほど差が大きく、すなわち音波伝搬が海底質から受ける影響が大きいことがわかる。この結果から、行動阻害を対象とした影響調査や緩和距離の設定のために音波伝搬

シミュレーションを行う場合は正確な海底質の把握が必要であるといえる。

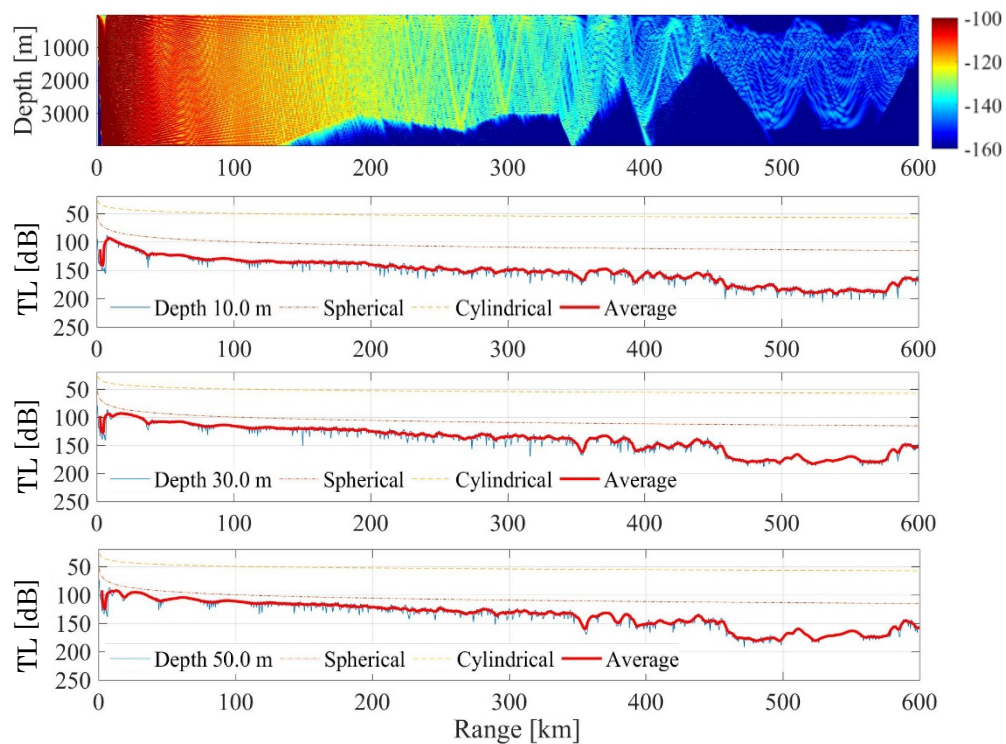


Fig. 6.14 ケース (d) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

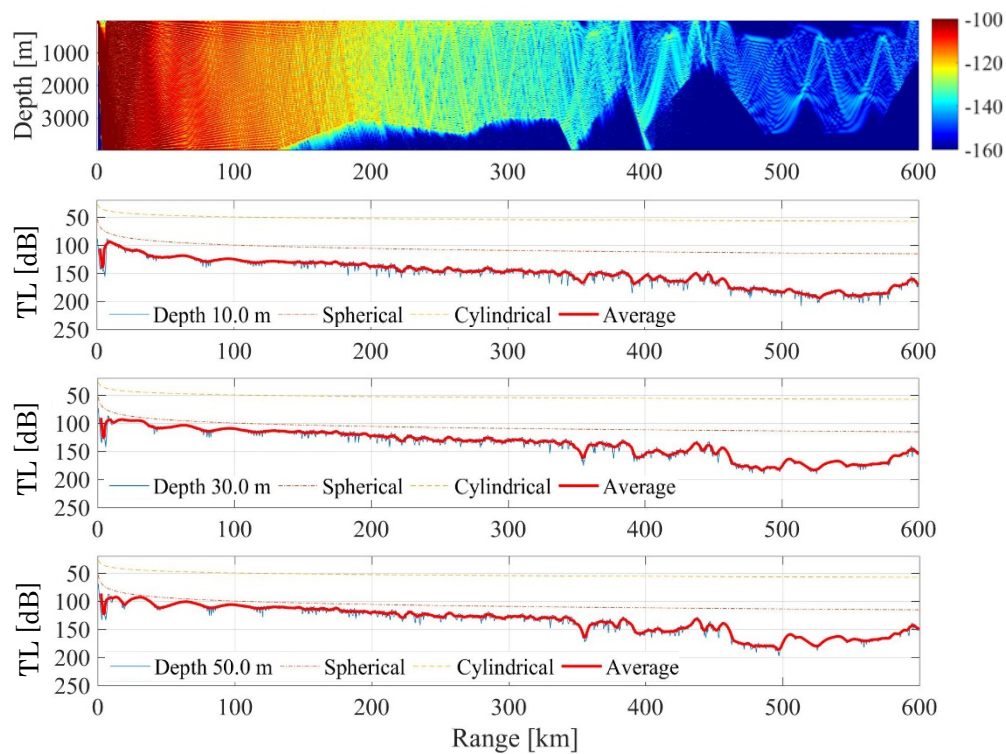


Fig. 6.15 ケース (e) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

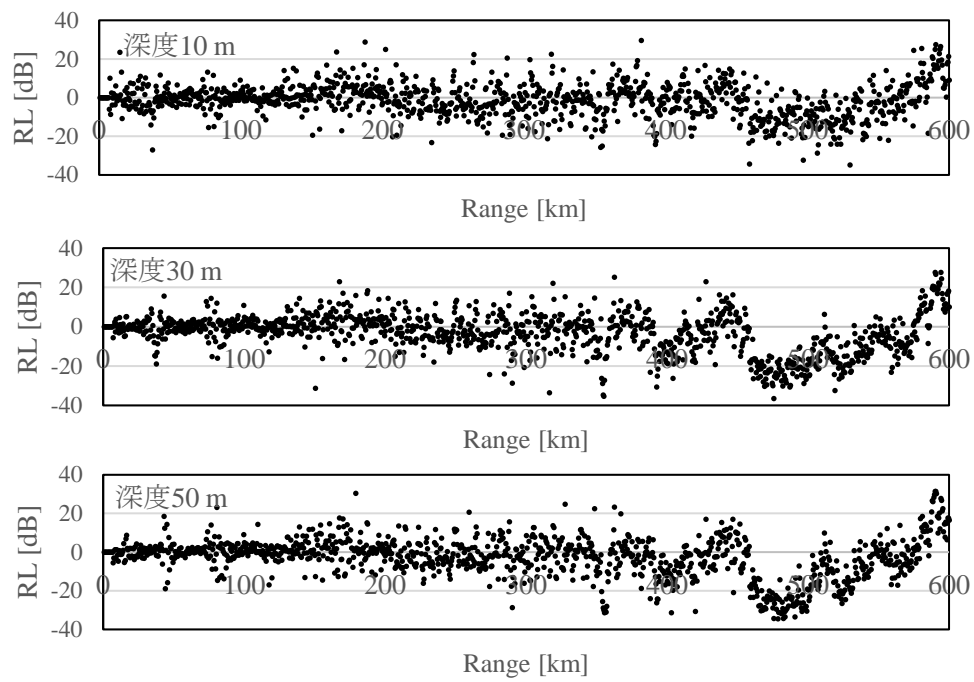


Fig. 6.16 ケース (d) とケース (b) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

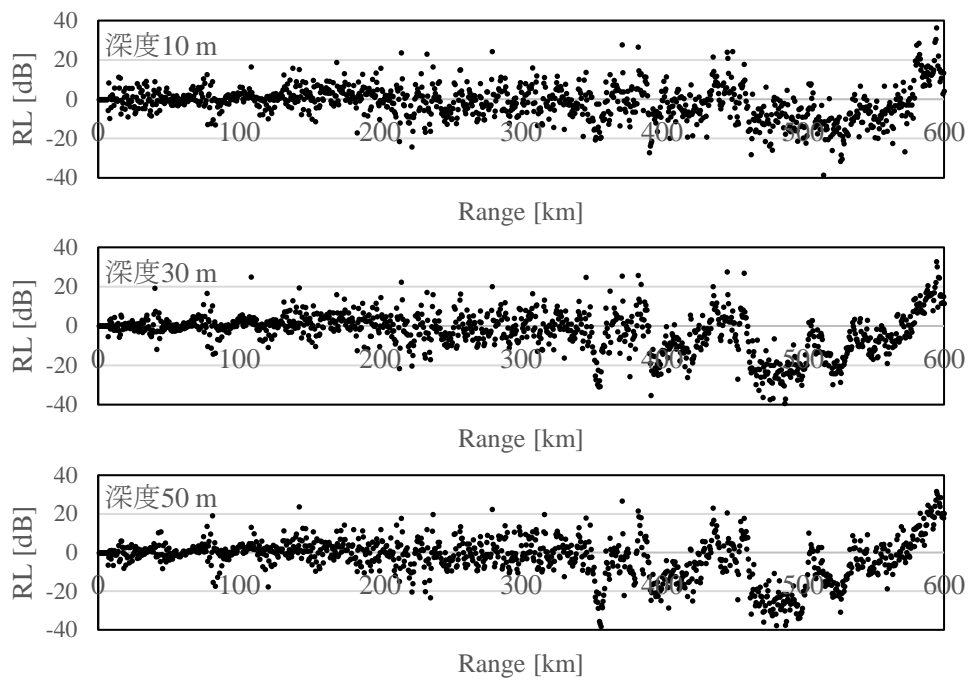


Fig. 6.17 ケース (e) とケース (c) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

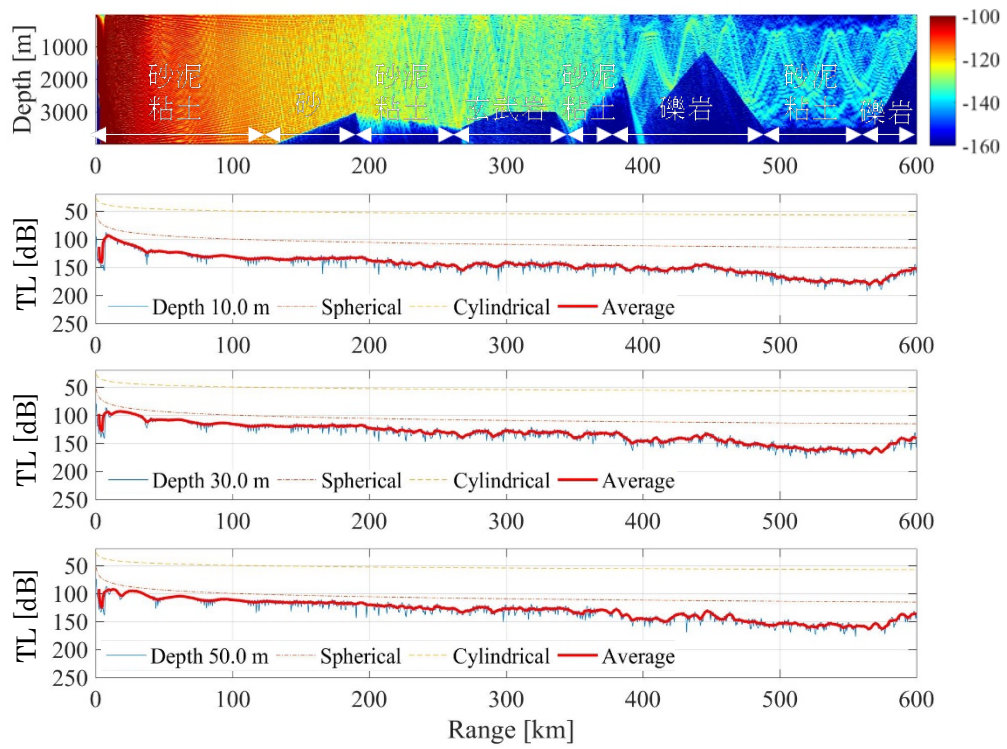


Fig. 6.18 ケース (f) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

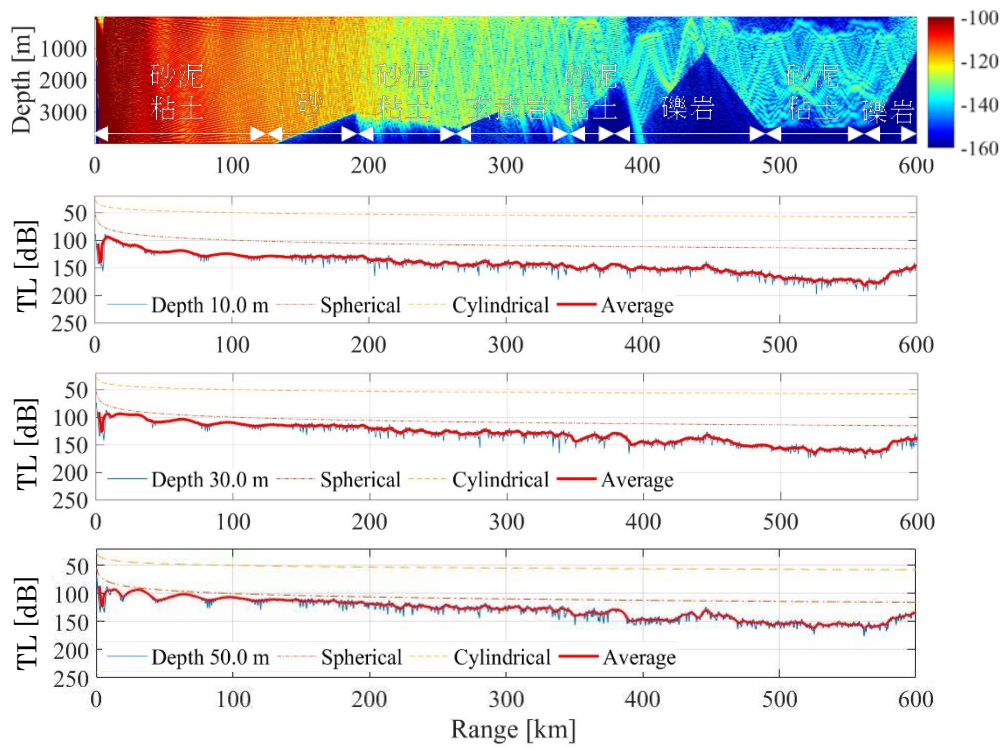


Fig. 6.19 ケース (g) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

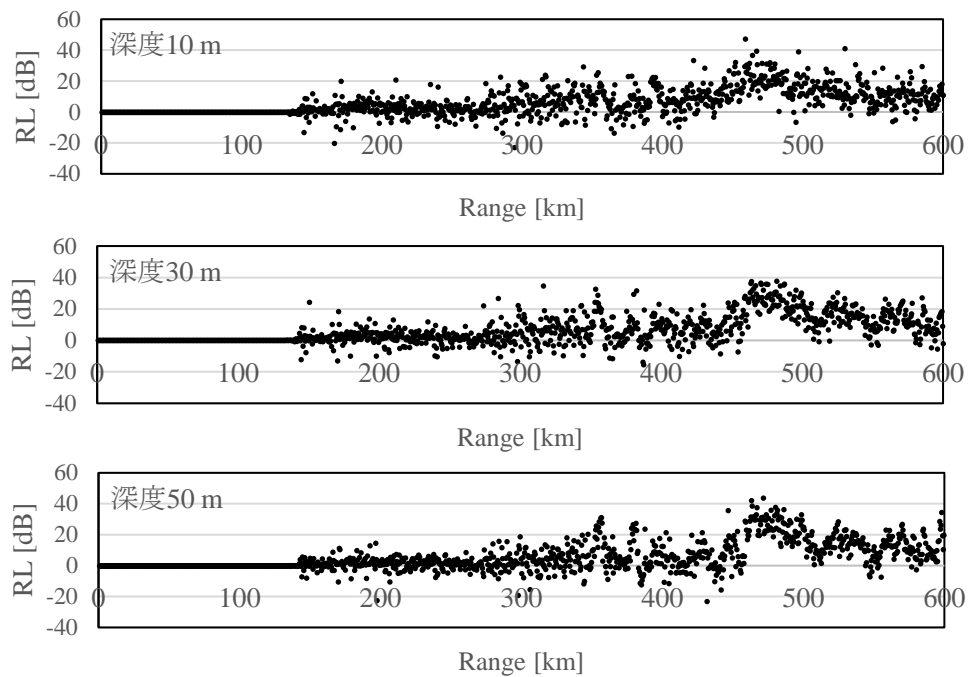


Fig. 6.20 ケース (f) とケース (d) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

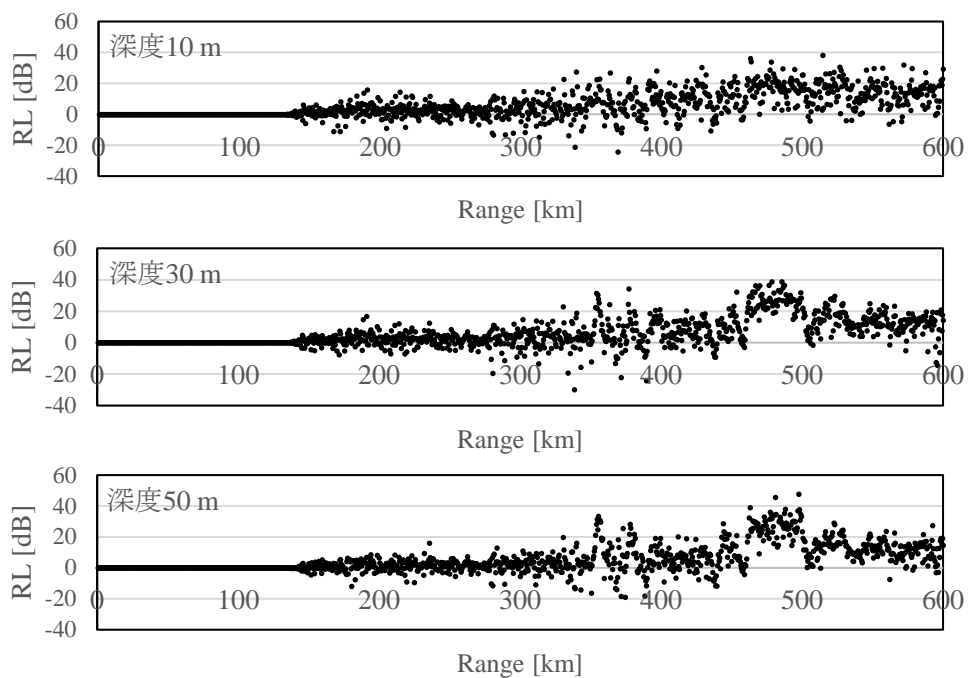


Fig. 6.21 ケース (g) とケース (e) の RL の差 (受波深度 10m, 30m, 50m)

6.3. 提案手法を用いた影響調査

提案手法を用いて影響調査を行い、その結果から緩和距離を求め、将来に向けた影響緩和策の展望について考察した。影響調査は、ケース (f)、(g) において送波点が受波点 C の 100 km 手前の測線上に存在するケース (f-1)、(g-1)、また送波点が点 C に、受波点が送波点 C の 100 km 手前の測線上に存在するケース (f-2)、(g-2) について行った。Fig. 6.22 に各ケースの側線を示した。また、Fig. 6.23, 6.24 にケース (f-1)、(g-1) の、Fig. 6.25, 6.26 にケース (f-2)、(g-2) の測線の横断面の伝搬損失 (TL) の分布および深度 10 m, 30 m, 50 m における距離方向の伝搬損失プロットを示した。各深度における距離方向の伝搬損失プロットとともに理想的な伝搬損失である球面拡散損失および円筒拡散損失のプロットを示した。

ケース (f-1) と (g-1)、ケース (f-2) と (g-2) を比較すると、送受波点の位置関係によらず、収束帯は夏季よりも冬季の方が送波点から数 km だけ遠い場所に形成される。ケース (f-1)、(g-1) とケース (f-2)、(g-2) を比較すると、同じ側線でも送受波点の位置関係が反対の場合とまったく異なる音波伝搬状況となることがわかる。これは、ケース (f-1)、(g-1) のように大深度域から送波した場合に対して、ケース (f-2)、(g-2) のように比較的浅い海域から送波した場合はより海底反射による寄与を受けるためである。

この結果から、各ケースについて、深度 10 m, 30 m, 50 m における緩和距離を求め、Table 6.1 に示した。緩和距離を設定するための閾値はザトウクジラなどの低周波数帯域を使用するグループに対し永久的聴覚障害を引き起こす PTS、一時的聴覚障害を引き起こす TTS、聴覚障害を引き起こす Harassment A、行動障害を引き起こす Harassment B である。PTS, TTS は NOAA が設定したものであり、ピーク音圧レベルである (NOAA, 2016b)。Harassment A, Harassment B は NMFS が設定したものであり RMS 音圧レベルである。また、球面拡散モデルを用いて求めた緩和距離も表中に示した。全ケースにおいて PTS, TTS を閾値とする緩和距離は位置・季節によらず等しい。Harassment A を閾値とする緩和距離は深度 30 m で 50 m, 深度 50 m で 100 m の差がある。これらはいずれも球面拡散モデルを用いて求めた緩和距離よりも 1000 m 以上小さい。しかし、Harassment B を閾値とする緩和距離は、各ケース、各深度間で大きな差がある。まず、ケース (f-1) より (g-1) が、ケース (f-2) より (g-2) が緩和距離は大きい。これは、収束帯が夏季よりも冬季の方が送波点から数 km だけ遠い場所に形成されるためであると考えられる。次に、ケース (f-1) より (f-2) が、ケース (g-1) より (g-2) が緩和距離は大きい。これは、ケース (f-2)、(g-2) はより海底反射による寄与を受けるためであると考えられる。さらに、全ケースにおいて受波深度が大きいほど緩和距離も大きい。これは、海面付近の音速勾配によって収束帯は海面付近に到達する前に屈折し、海面に近いほど伝搬損失が大きくなるためであると考えられる。また、ケース (f-1)、(g-1) では球面拡散モデルを用いて求めた距離よりも十分に小さいが、ケース (f-2)、(g-2) では球面拡散モデルを用いて求めた距離よりもはるかに大きい。これらの結果から、特に海棲ほ乳動物に対する行動障害を対象とした影響調査や緩和距離の設定を行う場合、対象とする位置・時期の正確な海洋環境基礎データを入力した音波伝搬シミュレーションを行う必要があることを確認した。また、ケース (f-1)、(g-1) では全深度において目視監視可能な緩和距離だが、ケース (f-2)、(g-2) では全深度において目視監視が不可能な緩和距離である。そのため、将来的に行動障害可

能性を最小化するための国際基準ガイドライン等が発行された場合、対象とする位置・時期によっては目視監視のみでなく音響機器による監視の強制化や、オペレーション自体を中止しなければならない場合も起こり得ると考えられる。

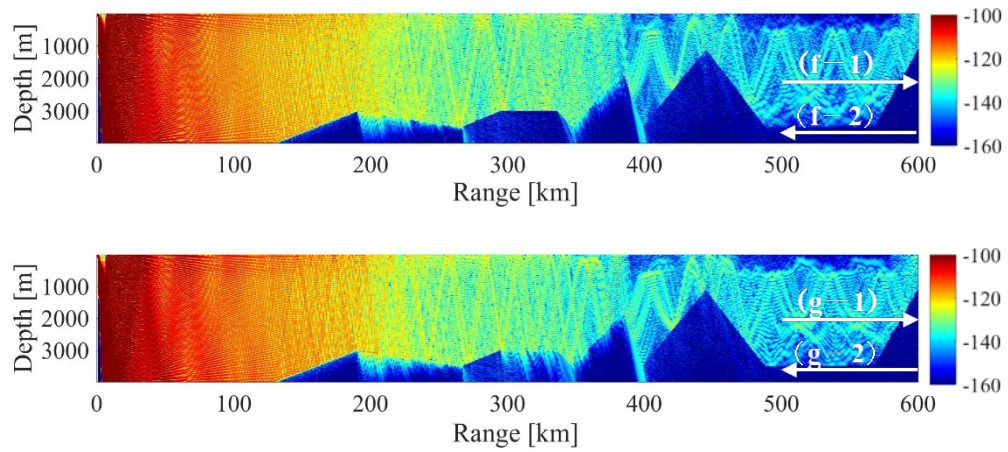


Fig. 6.22 ケース (f-1), (f-2), (g-1), (g-2) の測線

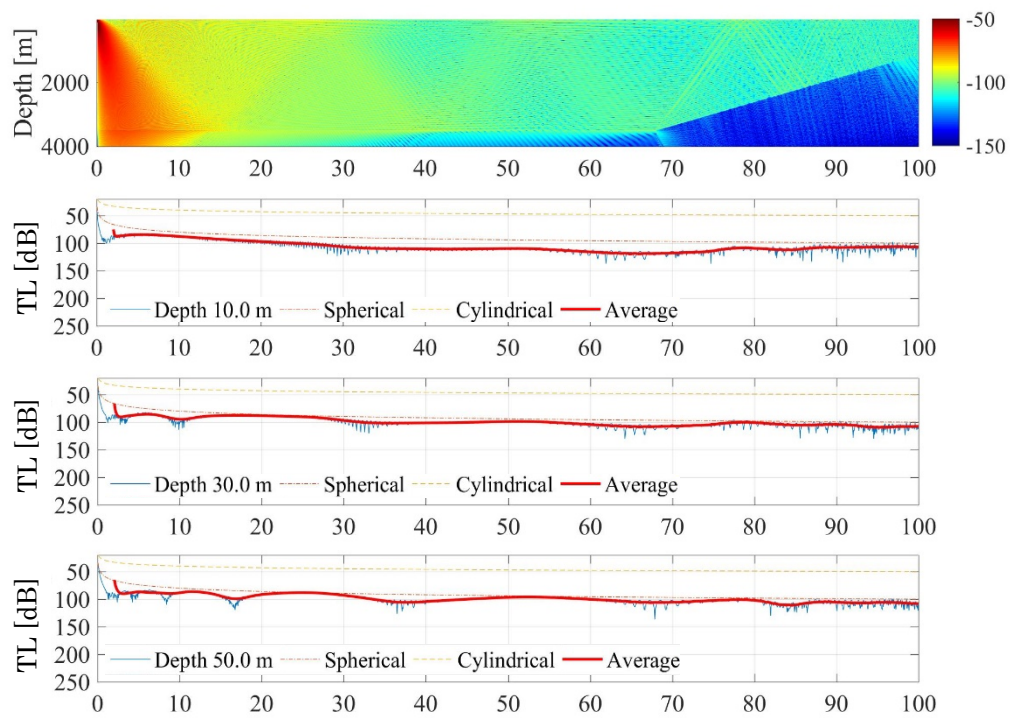


Fig. 6.23 ケース (f-1) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

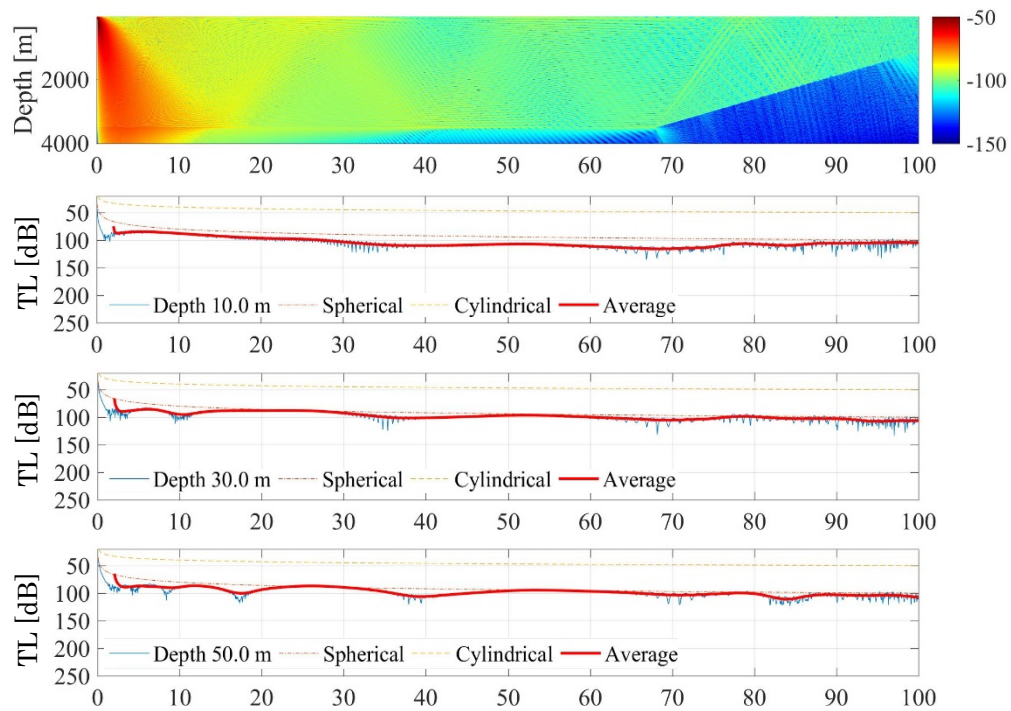


Fig. 6.24 ケース (g-1) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

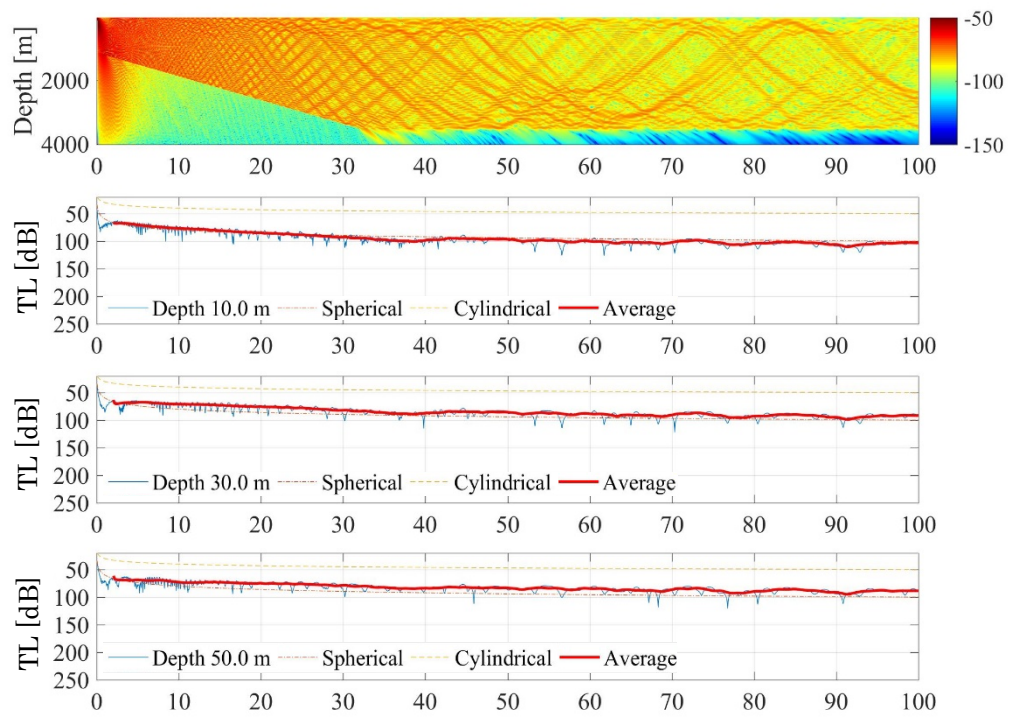


Fig. 6.25 ケース (f-2) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

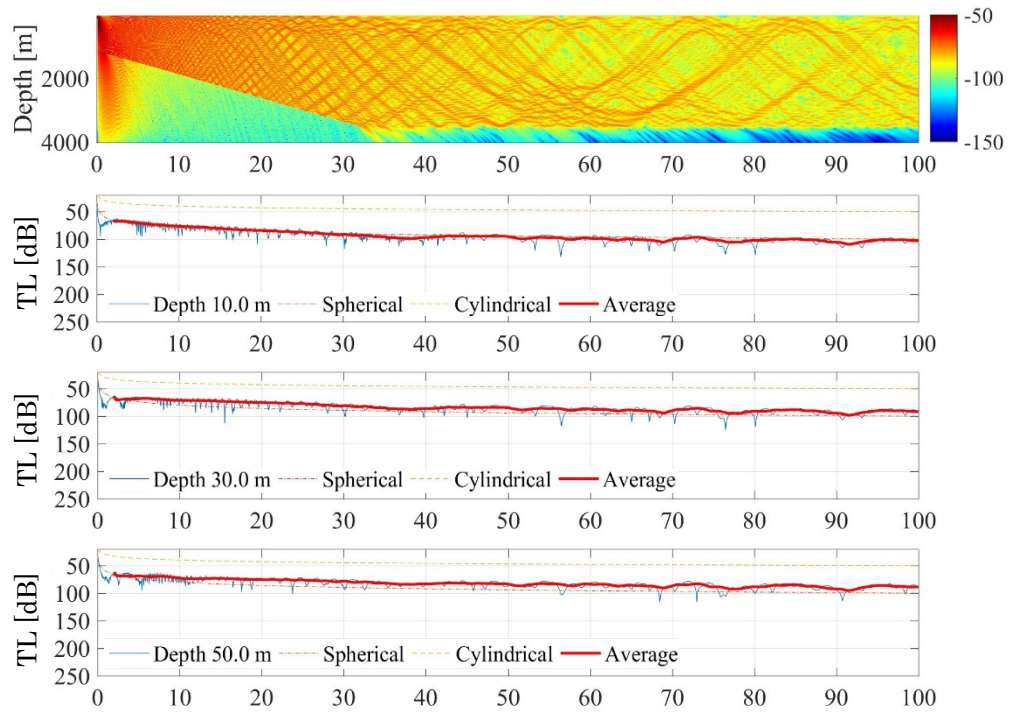


Fig. 6.25 ケース (g-2) の伝搬損失 (受波深度 10m, 30m, 50m)

Table 6.1 ケース (f-1), (g-1), (f-2), (g-2) の緩和距離

深度	閾値	球面拡散	(f-1)	(g-1)	(f-2)	(g-2)
10 m	PTS: 永久的聴覚障害	354 m	50 m	50 m	50 m	50 m
	TTS: 一時的聴覚障害	708 m	50 m	50 m	50 m	50 m
	Harassment A: 聴覚障害	1413 m	150 m	150 m	150 m	150 m
	Harassment B: 行動阻害	14125 m	400 m	550 m	21800 m	24850 m
30 m	PTS: 永久的聴覚障害	354 m	150 m	150 m	150 m	150 m
	TTS: 一時的聴覚障害	708 m	150 m	150 m	150 m	150 m
	Harassment A: 聴覚障害	1413 m	300 m	350 m	300 m	350 m
	Harassment B: 行動阻害	14125 m	750 m	900 m	46550 m	74200 m
50 m	PTS: 永久的聴覚障害	354 m	200 m	200 m	200 m	200 m
	TTS: 一時的聴覚障害	708 m	200 m	200 m	200 m	200 m
	Harassment A: 聴覚障害	1413 m	300 m	400 m	300 m	400 m
	Harassment B: 行動阻害	14125 m	900 m	1250 m	84200 m	84500 m

Table 6.2 ケース (f-1), (g-1), (f-2), (g-2) の行動阻害を対象とした緩和距離

深度	閾値	球面拡散	(f-1)	(g-1)	(f-2)	(g-2)
10 m	Harassment B: 行動阻害	14125 m	400 m	550 m	21800 m	24850 m
30 m		14125 m	750 m	900 m	46550 m	74200 m
50 m		14125 m	900 m	1250 m	84200 m	84500 m

7. 結言

海中の人為雑音が海洋生物、特に海棲ほ乳動物に悪影響を与えることが世界的に懸念されており、海中における生物の聴覚や雑音に対する反応の研究は盛んに行われてきた。また、同時に緩和距離の設定など、影響緩和へ向けた取り組みも行われてきた。影響調査・緩和距離の設定の際には、従来は海棲ほ乳動物の聴覚障害を引き起こす受波音圧レベルを閾値として簡易的な球面拡散モデルを用いて受波音圧レベルを計算することが一般的であった。しかし近年、短期的には深刻な影響を与えない行動阻害等でも、それを長時間与えることによって深刻な事態につながるとい研究結果が多く報告されており、行動阻害を引き起こす受波音圧レベルを閾値とした影響調査・緩和距離の設定を行うことが検討され始めている。行動阻害を引き起こす受波音圧レベルを閾値とする場合、遠距離の受波音圧レベルを計算する必要があるが、これは単純な拡散モデルで計算することはできず、対象とする位置・時期の正確な海洋環境基礎データを入力した音波伝搬シミュレーションによって求める必要がある。広大な海洋において対象とする位置・時期の海洋環境基礎データを取得することは容易ではないため、特に音速プロファイルについては、現状では LEVITUS データなどの過去の統計データや船舶で対象海域に赴いて観測したデータが使用されている。しかし、統計的に処理されたデータは、短期的な変動が含まれていない。また、船舶でデータを取得するには膨大なコストを要するため現実的ではない。

そこで本研究では行動阻害を対象とした影響調査手法の開発を目的とし、音速プロファイルを実タイムかつ取得が容易な Argo データから求める手法を提案し、地震探査のエアガンを想定音源、ザトウクジラの生息域である小笠原諸島周辺海域を対象海域とし、さまざまなケースのシミュレーションを行った。

まず、夏季と冬季の Argo データから求めた音速プロファイルを用いた音波伝搬シミュレーション、従来手法である球面拡散モデル、および統計データ（LEVITUS データ）を用いて計算した人為雑音源から受波点までの音場を比較し、季節性の水温変動が音波伝搬に有意な影響を与えることを明らかにし、提案手法の有効性を証明した。

また、海底地形データ、海底質データを使用した各ケースとも比較を行い、海底地形・海底質が音波伝搬に有意な影響を与えることを明らかにし、正確な海洋環境基礎データの輸入の重要性を示した。

さらに、季節および送受波点が異なる計 4 ケースについて提案手法を用いて行動阻害を対象とした影響調査を行い、緩和距離を求めた。この結果から、時期・位置によって緩和距離は大きく異なることを明らかにした。また、現在検討されている行動阻害を対象とした国際基準ガイドライン等が発行された場合、対象とする位置・時期によっては目視監視のみでなく音響機器による監視の強化や、オペレーション自体を中止しなければならない場合も起こり得ると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり，多大なるご指導やご助言を頂いた東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科清水悦郎准教授に心より感謝いたします．また，本研究の進め方や計算手法をご教授頂きました東京海洋大学博士研究員の土屋利雄博士に深謝いたします．また，夜中遅くまで研究にお付き合いいただきましたロボット工学研究室の方々にお礼を申し上げます．

参考文献

- Amy R. Scholik-Schlomer. (2015). Where the Decibels Hit the Water: Perspectives on the Application of Science to Real-World Underwater Noise and Marine Protected Species Issues. *Acoustic Today*, Summer, **11**(3), 36-44.
- Andrew, R.K., B.M. Howe, J.A. Mercer, and M.A. Dzieciuch. (2002). Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustic Research Letters Online*, **3**(2), 65-70.
- Andrew, R.K., B.M. Howe, and J.A. Mercer. (2011). Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast. *Journal of Acoustic Society of America*, **129**(2), 642-651.
- Bejder, L., A. Samuels, H. Whitehead, and N. Gales. (2006). Interpreting short-term behavioural responses to disturbance within a longitudinal perspective. *Animal Behaviour*, **72**, 1149-1158.
- Cato, D.H. (1992). The Biological contribution to the Ambient Noise in waters near Australia. *Acoustics Australia*, **20**(3), 76-80.
- Clark, C.W., W.T. Ellison, B.L. Southall, L. Hatch, S.M. Van Parijs, A. Frankel, D. Ponirakis. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201-222.
- Dahlheim, M.E. (1987). *Bio-acoustics of gray whale (Eschrichtius robustus)*, Univ. British Columbia, Vancouver, B.C.
- Erbe, C., C. Reichmuth, K. Cunningham, K. Lucke, and R. Dooling. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*, **103**, 15-38.
- Fofonoff, N.P. and R.C. Millard Jr. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO technical papers. No. 44.
- Francois R.E., G.R. Garrison. (1982a). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of Acoustic Society of America*, **72**(3), 896-907.
- Francois R. E., G.R. Garrison. (1982b). Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, *Journal of Acoustic Society of America*, **72**(6), 1879-1890.
- Gisiner. R.C. (2016). Sound and Marine Seismic Surveys. *Acoustic Today*, Winter, **12**(4), 10-18.
- Greene. Jr., C.R. and W.J. Richardson. (1988). Characteristics of Marine Seismic Survey Sound in the Beaufort Sea. *Journal of Acoustic Society of America* **83**(6), 2246-2254.
- Hildebrand, J.A. (2005). *Marine Mammal Research: Conservation Beyond Crisis, Impacts of Anthropogenic Sound*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.
- Iorio, L.D. and C.W. Clark. (2010). Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication. *Biology Letters*, **6**, 51-54.
- JASCO Applied Sciences. (2011). *Noise and the Effects on Marine Mammals: A Pocket Handbook* 3rd Edition.
- Jensen, F.B., W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt. (1994). *Computational Ocean Acoustics*. American Institute of Physics, New York.

- Knudsen, V.O., R.S. Alford and J.W. Emling. (1948). Underwater Ambient Noise. *Journal of Marine Research*, **7**(3), 410-429.
- Lee, D. & M.H. Shultz. (1995). *Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions*. World Scientific, Singapore.
- Lurton, X. (2002). *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. London, Springer Praxis Books.
- Lusseau, D. (2004). The hidden cost of tourism: Detecting long-term effects of tourism using behavioral information. *Ecology and Society*, **9**(1), 2.
- Lusseau, D. and Bejder, L. (2007). The long-term consequences of short-term responses to disturbance experiences from whale watching impact assessment. *Int J Comp Psych*, **20**, 228-236.
- McDonald, M.A., J.A. Hildebrand and S.M. Wiggins. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of Acoustic Society of America*, **120**(2), 711-718.
- Munk, W.H., R.C. Spindel, A. Baggeroer, and T.G. Birdsall. (1994). The Heard Island Feasibility Test. *Journal of Acoustic Society of America*, **96**(4), 2330-2342.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2016a). *Ocean Noise Strategy Roadmap*. Silver Spring, Maryland: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2016b). *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. Silver Spring, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- National Research Council. (2003). *Ocean Noise and Marine Mammals*, National Academic Press, Washington, D.C.
- Nieukirk, S.L., K.M. Stafford, D.K., Mellinger, R.P. Dziak and C.G., Fox. (2004). Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *Journal of Acoustic Society of America*, **115**(4), 1832-1843.
- Nowacek, D.P., L.H. Thorne, D.W. Johnston and P.L. Tyack. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review*, **37**(2), 81-115.
- Parente, C.L., Pauline de Araújo, J., and Elisabeth de Araújo, M. (2007). Diversity of cetaceans as tool in monitoring environmental impacts of seismic surveys. *Biota Neotropica* **7**(1), 49-56.
- Parks, S. E., C. W. Clark and P. L. Tyack. (2007). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of Acoustic Society of America*, **120**(2), 711-718.
- Parks, S.E., D.R. Ketten, J.T. O'malley and J. Arruda. (2007). Anatomical Predictions of Hearing in the North Atlantic Right Whale. *THE ANATOMICAL RECORD*, **290**, 734-744.
- Payne, R., and D. Webb. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* **188**, 110-141.
- Reichmuth, C. (2007). Assessing the hearing capabilities of mysticete whales. A proposed research strategy

- for the Joint Industry Programme on Sound and Marine Life on 12 September.
- Richardson, W.J., C.R. Greene, C.I. Malme, D.H. Thomson. (1995). *Marine Mammals and Noise*, Academic Press, San Diego, CA.
- Richardson, W.J., G.W. Miller, C.R. Greene. (1999). Displacement of mitigating bowhead whales by sounds from seismic surveys in shallow waters of the Beaufort Sea. *Journal of Acoustic Society of America*, **196**(4), 2281.
- Ross, D. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, New York.
- Shockley, R.C., J. Northrop, P.G. Hansen and C. Hartdegen. (1982). SOFAR propagation paths from Australia to Bermuda: Comparison of signal speed algorithms and experiments. *Journal of Acoustic Society of America*, **71**(1), 51-60.
- Southall, B., J. Berkson, D. Bowen, R. Brake, J. Eckman, J. Field, R. Gisiner, S. Gregerson, W. Lang, J. Lewandski, J. Wilson, and R. Winokur. (2009). Addressing the Effects of Human-Generated Sound on Marine Life. Interagency Task Force on Anthropogenic Sound and Marine Environment of the Joint Subcommittee on Ocean Science Technology, January 2009, 72.
- Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas, and P.L. Tyack. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, **33**(4), 411-521.
- The National Petroleum Council (NPC). (2011). OFFSHORE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF SEISMIC AND OTHER GEOPHYSICALEXPLORATION WORK. Working Document of NPC North American Resource Development Study, Paper #2-9.
- Urick, R.J. (1983). *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- Vedenev, A. and A. Shatravin. (2014). Deliverable report: D4.57– Safety zones and noise exposure criteria for marine mammals exposed to anthropogenic noise. Arctic Climate Change Economy and Society, Project no. 265863.
- Wartzok, D., and D.R. Ketten. (1999). Marine mammal sensory systems. Pages 117-175 in J.E. Reynolds III and S.A. Rommel, eds. *Biology of Marine Mammals*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.
- Wenz, G.M. (1962). Acoustical Ambient Noise in the Ocean: Spectra and sources, *Journal of Acoustic Society of America*, **34**(12), 1936-1956.
- Williams, R., D. Lusseau, and P.S. Hammond. (2006). Estimating relative energetic costs of human disturbance to killer whales (*Orcinus orca*). *Biological Conservation*, **133**(3), 301-311.
- JOGMEC 物理探査船グループ. (2014). 三次元物理探査船「資源」による調査活動についての報告. *Analysis*, **48**(5).
- 海洋音響学会. (2004). 海洋音響の基礎と応用, 成山堂書店, 東京.
- 土屋利雄, 後藤慎平, 平井由季乃. (2015). 地殻構造探査システム (MCS) のエアガン音源の海中伝搬に関する研究～高出力エアガン音源は遊泳する海棲ほ乳動物に影響を与えるか?～, *信学技報*, **115**(186), 43-48.

土屋利雄. (2011), 海洋音響計算 WEB サイト <http://www.tsuchiya2.org> の作成・公開, 海洋音響学会誌, **38**(2), 79-87.

日本船舶技術研究協会. (2015). 船舶水中騒音の海洋生物への影響に関する調査研究. 2015年度報告書.

研究業績

学術雑誌への発表論文 (主筆のみ)

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄, 後藤慎平, 布田浩二, 日吉善久. (2016). ARGO データと Google Earth の海底地形データを用いた海棲ほ乳動物に対するエアガン音波の影響調査手法, 海洋音響学会誌, **43**(4), 249-262.

国際学会発表 (主筆のみ)

H., Yukino, Toshio Tsuchiya, Shinpei G., Etsuro S., Koji F. (Dec. 2016). Long range sound propagation modeling for assessing seismic survey noise impacts on marine mammals. 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan.

国内学会発表 (主筆のみ)

平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 清水悦郎, 山本富士夫, 布田浩二, 日吉善久. (2016 年 3 月). アルゴデータを用いた MCS 探査による海棲ほ乳動物への影響事前調査手法, 日本音響学会.
平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 清水悦郎, 山本富士夫, 布田浩二, 日吉善久. (2016 年 5 月). アルゴデータと GMT の海底地形データを用いたエアガン音波の長距離伝搬調査, 海洋音響学会.

平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 布田浩二. (2016 年 8 月). 大出力音源が海棲ほ乳動物に与える影響の評価手法と緩和策, 電子情報通信学会.

表彰等

平井由季乃. (2016 年 7 月). ハイドロフォン搭載 Argo フロートを使用した全球的四次元海洋音響環境モニタリングシステム導入の提言, 海洋政策学会
東京海洋大学 学長賞 (2016 年 9 月) .